

T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OFDM SİSTEMLERİNDE YAPAY SİNİR AĞLARI
KULLANARAK KANAL DENGEME**

Tezi Hazırlayan
Abdullah Tuncay ÖZŞAHİN

Tezi Yöneten
Prof. Dr. Cebail ÇİFTLİKLİ

Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Haziran 2006

KAYSERİ

Prof. Dr. Cebraill ÇİFTLİKLİ danışmanlığında A. Tuncay ÖZŞAHİN tarafından hazırlanan “OFDM Sistemlerinde Kanal Dengeleme için Yapay Sinir Ağlarının Kullanılması” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

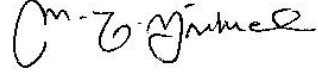
14 /08 / 2006

JÜRİ:

Başkan : Prof. Dr. Cebraill ÇİFTLİKLİ



Üye : Doç. Dr. M. Emin YÜKSEL



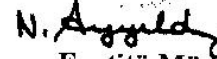
Üye : Doç. Dr. Celal YILDIZ



ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun **07/09/2006** tarih ve **2006/26-02** sayılı kararı ile onaylanmıştır.

27 / .09 / 2006.



Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin gerçekleşmesinde bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve uyarıları ile bana yol gösteren tez danışmanım Sayın **Prof. Dr. Cebrail ÇİFTLİKLİ' ye**, tez çalışmam esnasında her türlü yardım ve desteği benden esirgemeyen Arş. Gör. A. Çağrı Yapıcı' ya, manevi desteğini esirgemeyen değerli eşime ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan anneme ve babama teşekkürlerimi sunarım.

OFDM SİSTEMLERİNDE KANAL DENGELEME için YAPAY SİNİR AĞLARININ KULLANILMASI

A. Tuncay ÖZŞAHİN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2006

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cebirail ÇİFTLİKLİ

ÖZET

Bu çalışmada, çok taşıyıcılı modülasyonun özel bir şekli olan Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama tekniği (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM), bu tekniğin avantajları, dezavantajları, çok yollu yayılımın sistem performansı üzerindeki etkileri ve bu etkilerin ortadan kaldırılması için kullanılan yöntemler incelenmiştir. Bu tez çalışmasında, kablosuz kanal etkilerinin ortadan kaldırılması için yapay sinir ağları kullanılmıştır.

OFDM, birçok alt taşıyıcının kullanıldığı çok taşıyıcılı bir haberleşme tekniğidir. OFDM, bir modülasyon tekniği olarak tanımlanabileceği gibi aynı zamanda bir çoğullama tekniği olarak da tanımlanabilir. Çok taşıyıcılı iletimin sınırsız genişbant iletişimde kullanımını cazip kılan gecikme yayılımı toleransı ve spektrum verimliliği gibi birçok kullanışlı özelliği vardır. OFDM kullanımının en önemli sebeplerinden birisi frekans seçici sönmelenme ya da dar bant girişimine karşı direnci artırmasıdır. Çok taşıyıcılı yapıları sebebi ile OFDM işaretlerinin zarfları oldukça hızlı değişim göstermektedir. Hızla değişen zarf doğrusalsızlıklarına karşı oldukça hassas olan sistemlerin temel zayıflığıdır.

Kanalın bozucu etkileri, OFDM sistem performansını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bundan dolayı OFDM işaretleri alıcıya ulaştığında, demodülasyon yapılmadan önce dinamik kanal kestirimi ve dengeleme yapılması gereklidir. Literatürde, temel olarak deneme dizili ve kör kanal kestirimi olmak üzere iki kanal kestirim tekniği mevcuttur. Bu teknikler, çok yollu yayılımın bozucu etkilerini belli bir düzeye kadar azaltabilmektedirler.

Bu tez çalışmasının amacı, kanal dengeleyici olarak Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanarak klasik tekniklere kıyasla daha iyi bit – hata oranları (BHO) elde etmektir. Çalışmanın omurgası olan OFDM sistemine ait alıcı – vericiler ve Rayleigh dağılımına göre modellenmiş olan kanal yapısı ADS programında tasarlanmıştır. Kanal dengeleyici tasarımı ise, MATLAB programının YSA araç kutusu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. YSA ile tasarlanan kanal dengeleyici, ADS programında tasarlanan OFDM sisteminin kanal çıkışı ile alıcısı arasına yerleştirilmiştir. Dolayısıyla, yapılan simülasyonlarda her iki program ortak olarak çalıştırılmıştır.

Yapılan çalışma sonucunda, YSA tekniği ile elde edilen bit – hata değerler, İkinci Dereceden Aradeğerleme ve En Küçük Kareler teknikleri ile elde edilen bit – hata değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Çok taşıyıcılı modülasyon, OFDM, çok yollu kanal etkileri, kanal dengeleme, ADS

USING NEURAL NETWORKS FOR CHANNEL EQUALIZATION IN OFDM SYSTEMS

A. Tuncay ÖZŞAHİN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, July 2006

Thesis Supervisor: Prof. Dr. CebraİL ÇİFTLİKLİ

ABSTRACT

In this study, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), a special scheme of a multi-carrier modulation technique, its advantages, disadvantages, the effect of multi-path on the system performance and the methods used to eliminate this effect are investigated in detail. In this thesis, neural Networks are used for eliminating wireless channel effects.

OFDM is a multi-carrier communication technique which uses many subcarrier. OFDM could be defined as both modulation and mutiplexing technique. Multi-carrier transmission has a lot of useful properties such as delay-spread tolerance and spectrum efficiency that encourage their use in untethered broadband communications. One of most important for using OFDM is to increase the robustness against frequency selective fading or narrowband interference. Because of their multi-carrier structure OFDM signals have an envelope changing rapidly. Rapidly changing envelope is the main weakness of the systems that are so sensitive to nonlinearities.

Defective effect of channel is an important factor influences OFDM system performance. Therefore, when OFDM signal arrived to receiver, dynamic channel estimation and equalization must be done before demodulation. There are basicly two methods which called pilot-based channel estimation and blind channel estimation in the literature. These techniques decrease the effects of the multi-path distortion as much as possible.

Aim of this thesis, using Artificial Neural Networks as a channel equalizer and obtain bit – error rate results better than the classical methods. Transceiver which is the main structure of OFDM system and the channel structure was modelled according to Rayleigh distribution were designed in ADS program. Channel equalizer design was realized in MATLAB ANN toolbox. Channel equalizer which was designed in ANN was located between the channel output and the receiver of OFDM system which were designed in ADS. So, in the simulations both programs were run together.

In result of studies, bit – error rates were obtained in ANN were compared with bit – error rates were obtained in Second Order Interpolation and Least Square techniques.

Keywords: Multi-carrier modulation, OFDM, multi-path channel effects, channel equalization, ADS

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI.....	I
TEŞEKKÜR.....	II
ÖZET.....	III
ABSTRACT.....	V
KISALTMALAR.....	XI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	XII

1. BÖLÜM

GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Literatürdeki Yeri.....	1
1.2. Tezin Amacı ve Önemi	3

2. BÖLÜM

DİKGİN FREKANS BÖLMELİ ÇOĞULLAMA

2.1 Çoklu Erişim Teknikleri.....	5
2.1.1 Zaman Bölmeli Çoklu Erişim	5
2.1.2 Frekans Bölmeli Çoklu Erişim.....	6
2.1.3 Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA)	7
2.1.4 Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama.....	8
2.1.4.1 OFDM'in Tarihsel Gelişimi.....	10
2.2 OFDM Sistem Modeli.....	11
2.3 Alt Taşıyıcıların Üretilmesi	13
2.4 Güvenlik Aralığının Eklenmesi.....	15
2.5 Çoklu Yol Yayılım Etkisi	15
2.6 OFDM Sistem Parametrelerinin Seçimi	20
2.7 OFDM'in Avantajları Ve Dezavantajları.....	22

3. BÖLÜM

KANAL VE KANAL DENGEME

3.1 Giriş.....	24
3.2 Kablosuz İletişim Kanallarında Sönümlenme.....	25
3.3 Kanal Parametreleri.....	25

3.3.1 Çok Yollu Yayılım.....	25
3.3.2 Evreuyumlu Bant Genişliği.....	25
3.3.3 Evreuyumlu Zamanı.....	26
3.3.4 Doppler Yayılımı	26
3.4 Sönümlenmeli Kanalların Sınıflandırılması.....	26
3.4.1 Geniş Ölçekli Sönümlenme	26
3.4.2 Küçük Ölçekli Sönümlenme	27
3.4.2.1 Çok Yollu Yayılımın Sönümlenmeye Etkisi	27
3.4.2.1.1 Düz Sönümlenme	27
3.4.2.1.2 Frekans Seçici Sönümlenme	28
3.4.2.2 Doppler Yayılımı Sonucu Oluşan Sönümlenmeler.....	28
3.4.2.2.1 Hızlı Sönümlenme.....	28
3.4.2.2.2 Yavaş Sönümlenme (Slow Fading):	30
3.5 Rayleigh ve Rician Dağılımları.....	30
3.5.1 Rayleigh Dağılımı	30
3.5.2 Ricean Dağılımı	31
3.6 Kanal Kestirim Teknikleri	31
3.6.1 Blok Tip Pilot Yerleşimine Dayalı Kanal Kestirimi	32
3.6.2 Birleşik Tip Pilot Yerleşimine Dayalı Kanal Kestirimi	33

4. BÖLÜM

YAPAY SİNİR AĞLARI

4.1 Giriş.....	35
4.2 Yapay Sinir Ağlarının Genel Özellikleri.....	38
4.3 Transfer Fonksiyonları	39
4.4 YSA'ların Özellikleri	41
4.4.1 Doğrusal Olmama	41
4.4.2 Öğrenme.....	41
4.4.3 Genelleme Yapabilme.....	41
4.4.4 Uyarlanabilirlik	41
4.4.5 Donanım Olarak Gerçekleştirilebilme	42
4.4.6 Hataya Karşı Duyarlılık	42
4.5 YSA'ların Sınıflandırılması	42

4.5.1 YSA'larının Ağ Yapılarına Göre Sınıflandırılması	42
4.5.1.1 İleri Beslemeli Ağ Yapısı.....	43
4.5.1.2 Geri Beslemeli Ağ Yapısı	43
4.6 Yapay Sinir Ağı Yapıları	44
4.6.1 Çok Katmanlı Perseptron YSA Yapısı.....	44
4.7 YSA'larının Öğrenme Algoritmalarına Göre Sınıflandırılması.....	45
4.7.1 Geri Yayılım (BP).....	45
4.7.2 Momentumlu Geri Yayılım (BPM-Back Propagation Momentum)	46
4.7.3 Esnek Geri Yayılım (BPR-Back Resilient Propagation)	46
4.7.4 Eşleştirmeli Gradyan Azaltma Geri Yayılım (CG-Conjugate Gradien)	47
4.7.5 Quasi-Newton (QN).....	47
4.7.6 Delta-Bar-Delta (DBD).....	48
4.7.7 Genişletilmiş Delta-Bar-Delta (EDBD-Extended Delta-Bar-Delta).....	49
4.7.8 Levenberg Marquardt (LM)	49
4.7.9 Bayesian Düzenleme (BD) Öğrenme Algoritması	50

5. BÖLÜM

SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

5.1 Giriş.....	51
5.1.1 Simülasyonlarda Kullanılan Sistem Modeli.....	52
5.1.1.1 İkili Veri.....	53
5.1.1.2 QAM Modülatör.....	53
5.1.1.3 Ters Fourier Dönüşümü.....	53
5.1.1.4 Paralel - Seri Dönüşümü.....	53
5.1.1.5 Güvenlik Aralığı.....	53
5.1.1.6 Kanal.....	54
5.1.1.7 Alıcı.....	57
5.1.1.8 Kullanılan Test Parametreleri.....	57
5.2 Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Kanal Dengelemenin Gerçekleştirilmesi.....	58

6. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER.....	65
------------------------	----

KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	73

1. BÖLÜM

GİRİŞ

1.1 Tezin Literatürdeki Yeri

Günümüzde yeni nesil kablosuz yerel ağların çoklu ortamı desteklemesi için yüksek bit hızlarını desteklemesi gerekmektedir. Fakat iletim hattındaki gecikme yayılımı maksimum veri hızlarını sınırlamaktadır. Bu problemin üstesinden gelmek için, gecikme yayılımına karşı belirgin özelliklerinden dolayı çok taşıyıcılı modülasyon teknikleri kullanılabilmektedir [1].

Yüksek bit hızlı kablosuz veri iletimi için oldukça cazip bir teknik olan çok taşıyıcılı modülasyon tekniği, bir veriyi düşük hızlı çok sayıdaki birbirine dik (orthogonal) alt taşıyıcılar üzerinden iletmek için frekans bölmeli çoğullama tekniğini kullanan bir sistemdir. Veri tek bir taşıyıcı yerine nispeten daha yavaş olan alt taşıyıcılar üzerinden paralel olarak taşınır. Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) de özel birçok taşıyıcılı modülasyon tekniğidir. OFDM bir modülasyon tekniği ya da bir çoğullama tekniği olarak düşünülebilir. Literatürde OFDM'ye ait çeşitli amaçlara yönelik çok sayıda çalışma mevcuttur [1-60]. OFDM 'in ortaya çıkmasının en büyük nedenlerinden biri frekans seçici sönmülenme ya da dar bant karışımına karşı yeteneğinin artmasıdır [3-40]. Tek taşıyıcılı sistemlerde tek bir sönmülenme olayı ya da bir karıştırma olayı bütün hattın zayıflamasına neden olur. Çok taşıyıcılı sistemlerde ise alt taşıyıcıların küçük bir bölümü etkilenecektir [3-40]. Birkaç hatalı alt taşıyıcıyı düzeltmek için hata düzeltme kodlamaları kullanılabılır. Ayrıca, OFDM tekniğinde alt taşıyıcılar örtüşmüş şekilde olduğundan spektral verimlilik yüksektir [5]. Bu avantajlarından dolayı OFDM tekniği özellikle yüksek hızlı geniş yerel alan ağları (Wireless Local Area Network: WLAN) için uygundur. OFDM tekniği ayrıca sayısal ses yayını (Digital Audio Broadcasting: DAB) [32, 36], sayısal TV yayını [35], kablosuz yerel alan

ağları/simetrik olmayan aktarım modu (Local Area Netwok/ Asymmetric Transfer Mode: LAN/ATM) için geliştirilmiş ve standartlaştırılmıştır [32-35].

İletişim sistemlerini en çok etkileyen bozucu etkenleri toplanır beyaz Gauss gürültüsü (AWGN), simgeler arası girişim (ISI), yol kaybı (path loss), gölgeleme (shadowing) ve çok yollu sönümlenme (multipath fading) olarak sıralayabiliriz. Bu bozucu etkenlerden çok yollu sönümlenme, bir işaretin vericiden alıcıya birçok yoldan ulaşması nedeni ile alıcıda elde edilen işaretin genliğinde ve fazında ani değişimlerin olmasına neden olur. Alıcıya farklı zamanlarda ulaşan birden çok işaretin girişimi sonucu meydana gelen sönümlenme günümüzde hücresel ve kişisel iletişim sistemlerinde sıkça karşımıza çıkan ve etkisinin azaltılması gereken önemli bir bozucu etkindir.

Bu bozucu etkenler OFDM sistem performansını etkilemektedir. Bundan dolayı bu bozucu etkilerin alıcıda dinamik olarak giderilmesi gerekmektedir. Literatürde, OFDM sistemlerinde kanal kestirimi için geliştirilen birçok çalışma mevcuttur [3-40]. Literatürde, OFDM sistemlerinde kanal kestirimi, deneme dizili kanal kestirim ve kör (blind) kanal kestirimi olmak üzere iki grupta toplanır [3-40]. Deneme dizili metotlar pilot-destekli teknikler olarak da adlandırılır. Bu teknikte, vericide işarete alıcıda da bilinen bir işaret dizisi eklenir. Bu teknik herhangi bir haberleşme sistemine kolaylıkla uygulanabilir ve günümüzde en çok kullanılan kestirim tekniğidir. En önemli dezavantajı ise bant genişliği israfına neden olmasıdır.

Kör kestirim tekniğinde ise vericide işarete herhangi bir dizi eklenmez. İletilen işaretin matematiksel özelliklerini kullanır. Bant genişliğinin sınırlı olduğu uygulamalarda kullanılır. En önemli dezavantajı hesaplama yükünün çok olmasıdır. Bundan dolayı gerçek zamanlı sistemlere uygulanması zordur.

ADS de tasarlanan OFDM sistemi ile elde edilen işaret üzerindeki çok yollu yayılımın bozucu etkilerinin, MATLAB yazılımının Yapay Sinir Ağları (YSA) araç kutusu kullanılarak ortadan kaldırılması bu tezin konusunu teşkil etmektedir. Yapılan çalışma iki bölümde incelenebilir. Birinci bölümde, ADS programı kullanılarak OFDM sistemine ait alıcı ve vericilerin tasarımı gerçekleştirilmiştir. İkinci bölümde ise

tasarlanan sistemde, MATLAB programının YSA araç kutusu kullanılarak kanal dengeleme gerçekleştirilmiştir.

Yapılan simülasyon çalışmalarında OFDM sistemi, ‘Agilent Technologies’ firmasının yüksek frekans Elektronik Tasarım Otomasyon (EDA) yazılımı olan ADS programı kullanılarak tasarlanmıştır. OFDM sistemine ait alıcı ve vericilerin tasarımı gerçekleştirilirken, ADS programının haberleşme araç kutusu ve nümerik bileşenleri kullanılmıştır. Ayrıca, kanal dengeleme amacıyla geliştirilen yapay sinir ağı yazılımı MATLAB programında hazırlanmış ve bu yazılım ADS programına adapte edilmiştir. Böylece her iki programın ortak çalışması sağlanmıştır. MATLAB programının YSA araç kutusu, çalışmalarda sadece kanal dengeleyici olarak kullanılmıştır.

Simülasyon çalışmalarının amacı farklı sistem parametrelerine sahip OFDM işaretleri üretmek ve farklı kanal parametreleri altında OFDM sistemini test etmektir. Test parametreleri, ADS programı aracılığı ile kontrol edilmiştir. ADS programında tasarlanan OFDM sistemi ile elde edilen işaretler, yine ADS programında tasarlanan çok yollu kanal modeline uygulanmıştır. Böylece işaret, Rayleigh dağılımına bağlı olarak modellenen kanal ile bozucu etkilere maruz bırakılmıştır. Daha sonra kanal çıkışındaki işaret, YSA ile tasarlanan kanal dengeleyiciye uygulanmıştır. Burada ki amaç, kanalın bozucu etkilerinin ortadan kaldırılmasıdır. YSA çıkışındaki dengelenmiş işaret daha sonra yine ADS programında tasarlanan OFDM alıcısına uygulanarak demodüle edilmiştir. Böylece, orijinal giriş verisine yakın bir çıkış işareti elde edilerek, simülasyonlarda tasarlanan sistemler için işaret – gürültü oranına bağlı olarak (SNR) bit – hata oranları (BER) hesaplanmıştır. Hesaplanan sonuçlar, literatürde kullanılan tekniklerden En Küçük Kareler ve İkinci Dereceden Aradeğerleme teknikleri kullanılarak hesaplanan oranlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonrasında, tez çalışmasında önerilen tekniğin bu tekniklerden daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

1.2. Tezin Amacı ve Önemi

Binalar, tepeler ve yüksek nesnelerden yansıyarak alıcıya ulaşan işaretler, bozucu etkiler oluşturarak OFDM sisteminin performansı olumsuz yönde etkiler. Bu etkiler çok yollu yayılım olarak adlandırılır.

Çok yollu yayılım, alınana işaretin genliğinde ve fazında ani değişimlere neden olur. Bu, günümüz kablosuz haberleşme sistemlerinin performansını olumsuz yönde etkileyen bir faktördür. Literatürde, OFDM sistemlerinde kanalın bozucu etkilerini azaltmak için geliştirilen teknikler, deneme dizili kanal kestirim ve kör kanal kestirimi olmak üzere iki grupta toplanır. Deneme dizili teknikler, pilot işaret tabanlı teknikler olarak da adlandırılmaktadır. Bu teknik, günümüzde en çok kullanılan tekniktir. Dezavantajı ise bant genişliği israfına neden olmasıdır. Kör kestirim tekniğinde ise vericide işarete herhangi bir pilot işaret eklenmez. Alınan işaretin matematiksel özelliklerini kullanır. Bant genişliğinin sınırlı olduğu uygulamalarda kullanılır. En önemli dezavantajı hesaplama yükünün çok olmasıdır.

Bu tez çalışmasında ise, çok yollu yayılımın etkilerini azaltmak için YSA tabanlı bir dengeleme tekniği uygulanmıştır. Yapılan tezin amacı, OFDM sistemlerinde alınan işaretin genliğinde ve fazında ani değişimlere neden olan çok yollu yayılımın etkilerinin azaltılmasıdır. Literatürdeki mevcut tekniklerden farklı olarak bu çalışmada, ADS programı ve MATLAB programının YSA araç kutusu ortak olarak kullanılarak kanal dengeleme yapılmıştır. Bu sentez çalışmada, ADS programının MATLAB ile uyumu MatlabLink blokları kullanılarak sağlanmıştır. Tasarlanan sistemde bu bloklardan, kanal dengeleyici olarak faydalanılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonunda elde edilen bit – hata değerleri, önerilen bu tekniğin, En Küçük Kareler ve İkinci Dereceden Aradeğerleme tekniklerinden daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

Tezin ikinci bölümünde çoklu erişim teknikleri kısaca açıklanmış, daha sonra dikgen frekans bölmeli çoğullamanın tanımı, tarihsel gelişimi, sistem modeli bakımından detayları incelenmiştir. Üçüncü bölümde kablosuz radyo kanalları, çok yollu kanal parametreleri, kanal kestirimi ve kanal dengeleme için uygulanan teknikler incelenmiştir. Dördüncü bölümde ise yapay sinir ağları ve genel özellikleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Beşinci bölümde yapılan simülasyon sonuçları açıklanmıştır. Simülasyonlarda kullanılan ADS (Advanced Desing System) programı hakkında bilgi verilmiştir. Yapay sinir ağları kullanılarak gerçekleştirilen kanal dengeleme sonuçlarına yer verilmiştir.

2. BÖLÜM

DİKGEN FREKANS BÖLMELİ ÇOĞULLAMA

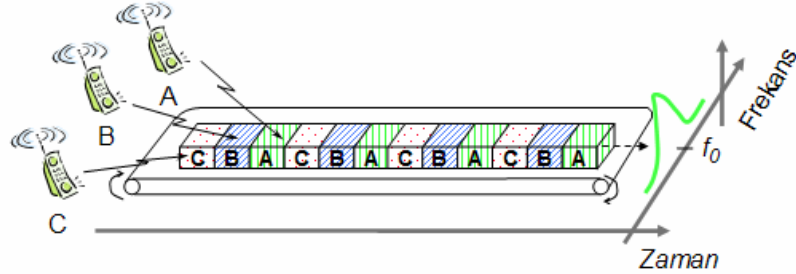
2.1 Çoklu Erişim Teknikleri

Çoklu erişim teknikleri, aynı anda birçok kullanıcıya aynı sabit bant genişliğine sahip tayf kullanma imkanı sağlayan tekniklerdir [1-4]. Bant genişliği sınırlı bir kaynak olduğundan bir radyo iletim sisteminde tahsis edilen bant genişliği sınırlıdır. Kablosuz ağların kapasitesini artırabilmek için bant genişliğinin bölünmesi gerekir. Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (FDMA), Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA) ve Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA) teknikleri, kablosuz bir sistemdeki mevcut bant genişliğini birçok kullanıcıya paylaştırmada kullanılan başlıca üç yöntemdir. Bu metotlar için, OFDM, hibrid TDMA ve FDMA sistemleri gibi çok sayıda teknik geliştirilmiştir.

2.1.1 Zaman Bölmeli Çoklu Erişim

Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA) protokolünde, zaman eşit çerçeve dilimlerine bölünür. Her bir zaman dilimi farklı bir kullanıcıya tahsis edilir. Tahsis edilen çerçeve boyutları aynıdır [13]. Kullanıcı, bu zaman dilimi boyunca bant genişliğinin tamamını kullanır. Çerçeveler arasına, birbirleriyle çakışmamaları için güvenlik aralığı olarak adlandırılan kısa bir süre bırakılır. Bu protokolde, her kullanıcıya aynı kapasite tahsis edilir. Bunun anlamı, bir zaman diliminden aktarılabilecek olan trafik miktarı, en yüksek trafiği oluşturan kullanıcıyı kaldırabilmelidir. Bunun dezavantajı ise daha az trafik taşıyan kullanıcılar bu durumda kapasitenin önemli bir bölümünü ziyan etmiş olacaklardır. Şekil 2.1’de TDMA’da her bir kullanıcıya tahsis edilen zaman aralıkları görülmektedir.

TDMA, kapasite israfına rağmen, basitliği nedeniyle çok kullanılan bir tekniktir. TDMA’da tek problem, her kullanıcının ne zaman ve ne kadar zaman boyunca iletim yapacağını bileceği şekilde kullanıcıların senkronize edilmesidir.

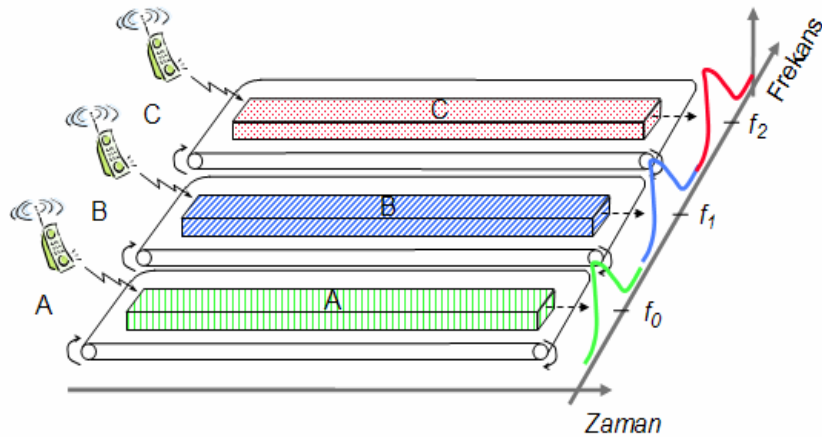


Şekil 2.1 Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA)

2.1.2 Frekans Bölmeli Çoklu Erişim

Frekans Bölmeli Çoklu Erişimde (FDMA), kullanılabilir bant genişliği çok sayıda dar bantlı kanallara bölünür. Komşu bantla arasında çakışmayı önlemek için bantlar arsına güvenlik bandı konur [66]. Her bir kullanıcıya işaret iletimi ve alımı için tek bir frekans bandı tahsis edilir. Arama esnasında kullanıcılardan hiçbiri aynı frekans bandını kullanmaz. Bu teknikte kullanıcılara tahsis edilen bant genişliği genellikle düşüktür (30 KHz). Şekil 2.2’de FDMA mantığı görülmektedir.

FDMA’da da TDMA’daki gibi kapasite israfı söz konusudur. Paket gecikmesi açısından performansı biraz düşüktür. Senkronizasyon gerekmediği için TDMA’a oranla gerçekleştirilmesi daha basittir.



Şekil 2.2 Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (FDMA)

2.1.3 Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA)

Kod bölmeli çoklu erişim tekniklerinin birde fazla yöntemi vardır. Bunlardan en yaygın olanları frekans sıçramalı (Frequency Hopping: FH) ve doğrudan dizili (Direct Sequence: DS) yöntemleridir [12]. Şekil 2.3’de CDMA tekniği görülmektedir.

CDMA protokolleri eş zamanlı iletim sağlar, frekansın bölünmesi gerekmez, iki ya da daha fazla terminalin aynı anda iletimi sağlanabilir, fakat aynı anda iletim yapan abone sayısı arttıkça paketlerin başarılı iletilme olasılığı azalır.

DS-CDMA protokolünde, modüle edilmiş veri işareti sayısal bir kod işaretiyle doğrudan modüle edilir. Alıcı tarafta da üretilen kod dizisiyle demodülasyon yapılarak orijinal veri işareti elde edilir. Alıcı tarafın kod dizisi ile vericinin kod dizisi aynı ve eş zamanlı olmalıdır.

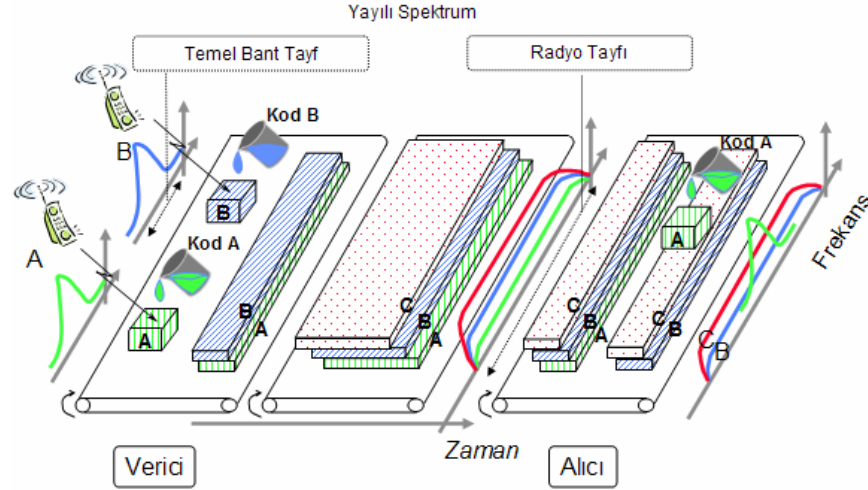
Bu protokolün avantajı yansımalarla karşı dirençli olmasıdır. Fakat yakındaki bir aboneden alınan işaret uzaktaki bir aboneden alınan işarettten daha güçlü olacaktır. Bir kullanıcı bant genişliğinin tamamını kullanarak iletim yapığundan, baz istasyona yakın olan abonelerin algılanması zorlaşacak biçimde girişim oluşturmaktadır. Yakın-uzak etkisi olarak adlandırılan bu problemi çözmek için pahalı bir güç kontrolü gerekmektedir.

FH-CDMA protokolünde, modüle edilen veri işaretinin taşıyıcı frekansı sabit değildir ve periyodik olarak değişir. Bu frekans sıçraması bir kod dizisi tarafından belirlenir. Frekans sıçramasının sayısı veri oranından daha fazla ya da daha az olabilir. Bu yöntem, yakın-uzak etkisine karşı dirençlidir. Fakat çoklu yönlerden gelen yansımaların neden olduğu sönümlenme etkisinden etkilenmektedir.

CDMA’yı kullanışlı yapan özelliklerden bazıları:

- İşareti gizlemesi ve mevcut sistemlerle etkileşimi olmaması,
- Boğmayı önlemesi ve paraziti geri çevirmesi,
- Bilgi gizliliği sağlaması,

- Hat üzerinde hatasız olarak işlemesi,
- Çok kullanıcılı erişime izin vermesi,
- Çoklu yol toleransı sağlamasıdır.



Şekil 2.3 Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA)

CDMA, ilk olarak 2. Dünya Savaşı sırasında sıkışma olması durumunda çalışan ve haberleşmenin gizli yürütülmesine imkan veren bir yöntem olarak askeri uygulamalar için geliştirilmiştir. Uzun yıllar boyunca bu teknik sadece askeri teknolojilerde uygulanmış, fakat LSI ve VLSI tasarımıındaki hızlı gelişmelerle ticari sistemlerde de kullanılmaya başlanmıştır.

2.1.4 Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama

Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM), FDMA'a benzer olup Frekans Bölmeli Çoklu Erişim tekniğinde çok kullanıcılı erişim, mevcut bant genişliğinin birçok kanala bölünmesiyle gerçekleşir [1]. Daha sonra bunlar kullanıcılara tahsis edilir. OFDM, tek bir veri akışının düşük hızlı birçok alt taşıyıcı üzerinden iletiildiği özel bir çok taşıyıcı iletim tekniğidir. OFDM tekniğinde kanallar birbiriyle örtüşmüş şekilde olduğundan tayf daha verimli kullanılır. Bu, bütün taşıyıcıların birbirine göre dikgen (dik) olmasıyla gerçekleşir. Böylece taşıyıcıların örtüşmesi bir girişime neden olmaz.

Tipik olarak ses haberleşmesi için FDMA'da her bir kanala 10-30 KHz bant genişliği tahsis edilir. Bununla birlikte ses iletimi için gereken minimum bant genişliği ise 3 KHz'dir. Tahsis edilen bant genişliği kanalların birbiriyle girişimini engellemek için gereken minimum miktardan daha geniş yapılır. Kanallar arasındaki boşluktan dolayı toplam tayfın yaklaşık olarak %50'sine kadar çıkabilen oranlarda bir alan boşa harcanmaktadır. Bant genişliğinin sınırlı bir kaynak olduğu düşünülürse bu kayıp önemli hale gelmektedir.

Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA), birkaç kullanıcı tarafından kullanılan daha geniş bant genişlikli kanallar kullanılarak bu sorunun kısmen üstesinden gelmektedir. Verilerini zaman domeninde iletmek suretiyle birçok kullanıcı aynı kanal erişebilir. Bundan dolayı birçok veri hızı düşük kullanıcı, yeterli bant genişliği olan tek kanalda iletmek üzere birleşebilir. Böylece bant genişliği daha verimli kullanılmış olur. Fakat TDMA'da yayılım gecikme değişimleri ve eş zamanlama hatalarından dolayı kullanıcı sayısı sınırlanmaktadır.

OFDM, TDMA ve FDMA'nın her ikisindeki sorunların üstesinden gelmektedir [1, 66, 68]. Bu teknikte mevcut bant genişliği birçok dar bantlı kanala bölünür (tipik olarak 100-8000 arasında). Her iki kanaldaki taşıyıcılar birbirine göre dikgen olduğundan birbirlerine çok yakın yerleştirilebilir. Dikgenlikten kasıt, işaret periyodu boyunca her bir taşıyıcının tamsayı salınımlara sahip olmasıdır [1, 66, 68]. Bundan dolayı her bir taşıyıcının tayfı, sistemdeki diğer taşıyıcının merkez frekansında sıfıra sahiptir. Bu da girişim olmaksızın taşıyıcılar üst üste yerleştirilmesine imkan verir.

OFDM tekniğinde işarettaki her bir taşıyıcının bant genişliği çok dar olduğunda (örneğin 1 KHz) sonuçtaki işaret hızı düşük olacaktır. Bu da işaretin çoklu yol gecikme yayılımına karşı yüksek toleranslı olmasını sağlar. Çünkü önemli miktarda semboller arası girişime sebep olabilmesi için gecikme yayılımının çok uzun olması gerekmektedir (>500 mikrosaniye).

OFDM tekniğinin en önemli avantajlarından birisi frekans seçici sönmülme ya da dar bant girişime karşı direnci artırmasıdır [1-25]. Tek taşıyıcılı bir sistemde tek sönmü ya

da girişim bütün bir hattı zayıflatırken, çok taşıyıcılı bir sistemde alt taşıyıcıların sadece küçük bir yüzdesi bu durumdan etkilenecektir.

2.1.4.1 OFDM'in Tarihsel Gelişimi

Paralel veri iletimi ve frekans bölmeli çoğullama kavramı 1960'ların ortasında ortaya çıkmıştır. U.S. patenti ise 1970'de verilmiştir.

Geleneksel paralel veri iletim sistemlerinde kullanılabilir bant genişliği N adet örtüşmeyen frekans alt kanalına bölünüp, her bir kanal ayrı bir sembolle modüle edilir. Böylece N adet alt kanal frekans çoğullanır. Kanallar arası girişimi engellemek için taşıyıcılar çakıştırılmamakla birlikte, bu mevcut kanalların verimsiz kullanılmasına neden olmaktadır. Daha verimli bir sistem oluşturulmak için 1960'ların ortasından itibaren başlayan çalışmalar OFDM sisteminin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

OFDM sisteminde taşıyıcılar birbiriyle örtüştüğünden, geleneksel paralel veri iletim sistemlerine göre %50 'lik bir tasarruf sağlanmaktadır [1]. Taşıyıcıların birbiriye girişim oluşturmada örtüşebilmesi, birbirlerine göre dikgen (dik) olmasıyla gerçekleştirilir.

Araştırmaların birçoğu dikgen frekanslı taşıyıcılara dayanan yüksek verimli çok taşıyıcılı iletim tekniği üzerine odaklanmıştır. 1971'de Wienstein ve Elbert, modülasyon sürecinin bir başlangıcı olarak paralel veri iletim sistemlerine Ayrık Fourier Dönüşümü uygulamışlardır. Vericide Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (IFFT) kullanılarak modülasyon yapılırken, alıcıda demodülasyon işlemi Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kullanılarak gerçekleştirilir.

1960'larda OFDM tekniği askeri sistemlerde kullanılmıştır. 1980'li yıllarda ise yüksek hızlı modemleri sayısal gezgin haberleşme ve yüksek yoğunluklu kayıt için tasarlanmıştır. 1990'lara gelindiğinde ise mobil radyo FM kanalları üzerinden geniş bant veri haberleşmesi, yüksek bit hızlı sayısal abone hatları (ADSL, 6 Mbps'e kadar), çok yüksek hızlı sayısal abone hatları (VDSL, 100 Mbps), sayısal ses yayını (DAB) ve yüksek çözünürlüklü televizyon uydu yayınları için kullanılmaya başlanmıştır [16-18].

2.2 OFDM Sistem Modeli

Yüksek bit hızlı kablosuz veri iletimi için oldukça cazip bir teknik olan OFDM bir veriyi düşük hızlı çok sayıdaki birbirine dik (orthogonal) alt taşıyıcılar üzerinden iletmek için frekans bölmeli çoğullama tekniğini kullanan bir sistemdir. Veri tek bir taşıyıcı yerine nispeten daha yavaş olan alt taşıyıcılar üzerinden paralel olarak taşınır.

OFDM ‘i burada bir modülasyon tekniği yada bir çoğullama yöntemi olarak düşünebiliriz.

OFDM ‘in ortaya çıkmasının en büyük nedenlerinden biri frekans seçici sönmülenme ya da dar bant girişimine karşı yeteneğinin artmasıdır. Tek taşıyıcılı sistemlerde tek bir sönmülenme olayı ya da bir karıştırma olayı bütün hattın çökmesine neden olur. Çok taşıyıcılı sistemlerde ise alt taşıyıcıların küçük bir bölümü etkilenecektir. Birkaç hatalı alt taşıyıcıyı düzeltmek için hata düzeltme kodlamaları kullanılabilir.

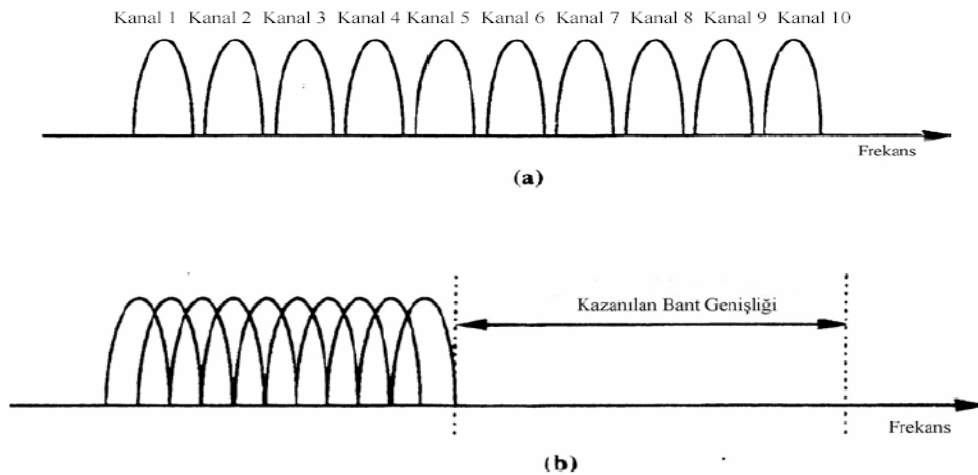
Klasik bir paralel bilgi sisteminde toplam işaret frekans bandı birbiriyle çakışmayan N tane frekans alt kanalına bölünür [16-18]. Her bir alt kanal ayrı bir sembolle modüle edilir ve bu durumda N tane alt kanal frekans çoğullanmıştır. Kanallar arası girişim ortadan kaldırmak için kanalların tayf (spectral) çakışmasından kaçınılması gerekir. Buna rağmen, bu elimizdeki tayfin etkin olmadan kullanılmasına yol açar. Bu etkinsizlikle baş edebilmek için 1960’lı yılların ortalarından beri ileri sürülen düşünceler, eldeki bant genişliğini tamamıyla kullanmak, yüksek hızlı denkleştirme kullanmaktan kaçınmak darbesel gürültü ile ve çok yol bozunumu ile mücadele etmek için her bir çakışan kanalın b işaretleme hızı kullanarak frekansta b kadar uzakta yerleştirildiği çakışan kanallı FDM ve paralel veri kullanmaktır.

OFDM çoklu modüle edilmiş alt taşıyıcıları sıkıştırarak gerekli olan bant genişliğini azaltıp verimli hale getirir. OFDM işaretlerin birbirine dik kalmasını ve işaretler arası girişimi engeller.

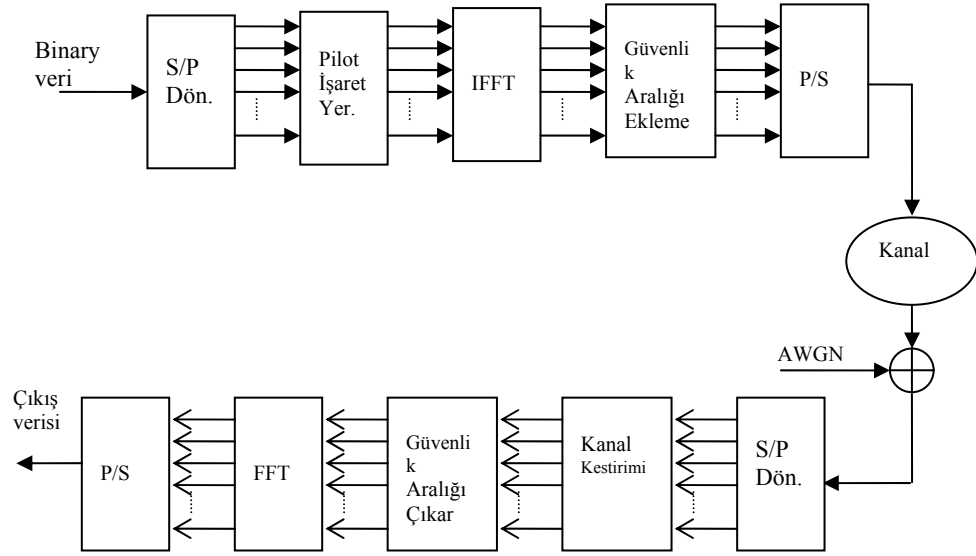
Alt taşıyıcılarda istenilen herhangi bir modülasyon yöntemi kullanılabilir. Modüle edilmiş taşıyıcıların çıkışları iletilmeden önce bir araya getirilir. Alıcıda demodüle edilmeden önce modüle edilmiş taşıyıcılar ayrılmalıdır. Bantları ayırmada kullanılan yöntem ise FDM (Frekans Bölmeli Çoğullama) 'dır.

Şekil 2.4.a'da klasik bir FDM sisteminde, Şekil 2.4.b'de OFDM sisteminde kanalların yerleşimi gösterilmektedir. FDM'de çok taşıyıcı bulunmasına karşın bunlar birbirine dik değildir. Bu yüzden bunların çakışmasını önlemek için taşıyıcılar arasına güvenlik bandı konulmak zorundadır. Bu güvenlik bantları her biri farklı sembollerle modüle edilmiş alt taşıyıcıları birbirinden ayırarak iletimin sorunsuz gerçekleşmesini sağlayacaktır. Fakat bu da bant genişliğinin verimli kullanılmamasına neden olacaktır..

OFDM'de ise çok sayıdaki alt taşıyıcı birbiri ile çakışır durumda bulunmaktadır. Bu yöntemde bant genişliği verimli bir şekilde kullanılır. Bu yöntemle sağlanan en önemli fayda taşıyıcılar arası çapraz karışmanın azaltılmasıdır. Bunu sağlayan ise farklı modüle edilmiş taşıyıcılar arasındaki diklik durumunun gerçekleştirilmesidir. Şekil 2.5.'de bir OFDM sistemine ait blok diyagram görülmektedir.



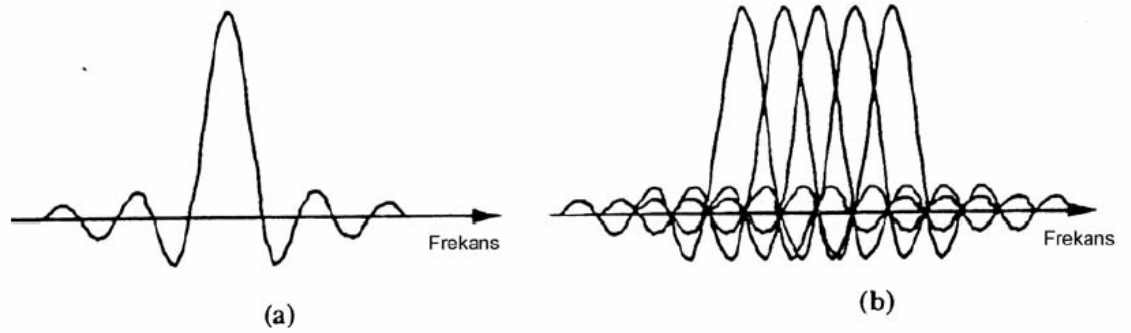
Şekil 2.4. FDM Çok Taşıyıcılı Tekniği ve OFDM Dik (orthogonal) Çok Taşıyıcılı Modülasyon Tekniği (a) FDM Çok taşıyıcılı tekniği (b) OFDM Dik (orthogonal) çok taşıyıcılı modülasyon tekniği



Şekil 2.5. OFDM sistemine ait blok diyagram

2.3 Alt Taşıyıcıların Üretilmesi

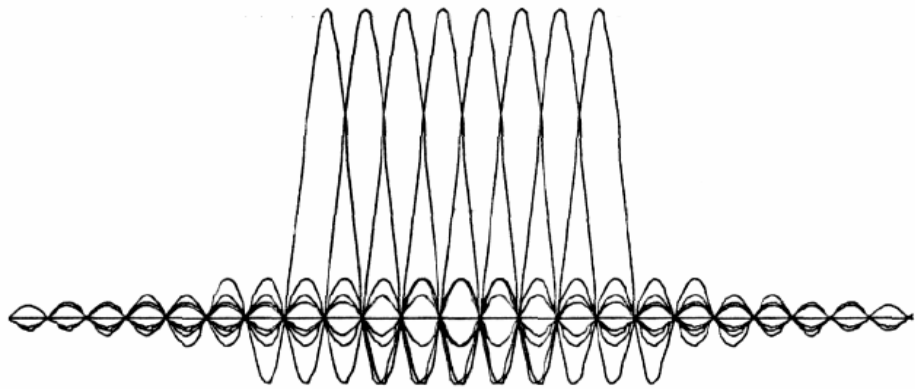
OFDM tekniğini FDM tekniğinden ayıran en önemli özelliğin daha verimli bir yöntem olan alt taşıyıcıların birbirine dik olacak şekilde üst üste bindirilmesidir. Bu işlemi Ayırık Fourier Dönüşümü (DFT) kullanarak gerçekleştirebilir. 1971 yılında Weinstein ve Ebert modülasyon ve demodülasyon işleminin bir parçası olarak paralel bilgi iletim sistemlerine Ayırık Fourier Dönüşümünü (DFT) uygulamışlardır [12]. Şekil 2.6 (a) alt taşıyıcıya ait bilginin tayfını gösterir. Şekil 2.6 (b) ise her alt taşıyıcının iletim hızına eşit b frekans aralıklı müstakil tayf içindeki çoğullanmayı OFDM işaretini göstermektedir. Şekil 2.4 her bir alt taşıyıcının frekans merkezinde başka kanallardan çapraz girişim olmadığını göstermektedir. Bu nedenle alıcıda DFT kullanırsak ve her bir alt taşıyıcının merkez frekansında ilintisini hesaplırsak çapraz girişim olmadan iletilen bilgiyi tekrar elde edebiliriz. Buna ek olarak DFT tabanlı çok taşıyıcı tekniğini kullanarak frekans bölmeli çoğullama sadece bant geçiren süzme ile değil aynı zamanda temel bant işlemi ile elde edilir.



Şekil 2.6. OFDM Alt Knalallarının ve OFDM İşaretlerinin Tayfı (a) OFDM alt kanal tayfı (b) OFDM işaret tayfı

Yüksek hızlı Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform - FFT) sağlayan entegre çiplerin geliştirilmesiyle DFT uygulamalarının daha kolay gerçekleştirilebileceği görülmüştür.

Normal bir FDM sistemde taşıyıcıların her biri bir osilatör yardımı ile üretilmektedirler. Ancak OFDM'de bu işlemi tek bir IFFT kullanarak gerçekleştirebiliriz [1-25].



Şekil 2.7. 8 Alt taşıyıcılı bir OFDM işaret tayfı

Yukarıdaki Şekil 2.7'de 8 alt taşıyıcılı bir OFDM işaretin tayfı göstermektedir. IFFT ile her bir alt taşıyıcının maksimum noktalarına gelen tayf değerleri hesaplanır. IFFT her bir alt taşıyıcıyı diğer alt taşıyıcılardan etkilenmeyecek şekilde modüle edebilir [18].

Her taşıyıcının tepe noktasında diğer taşıyıcılara ait bileşenler “sıfır” değerini alır. Bu da taşıyıcıların birbirine dik olduğunu gösterir.

İşaretlerin alıcı tarafta demodüle edilmesi sırasında FFT (Fast Fourier Transform – Hızlı Fourier Dönüşümü) kullanılır. FFT uygulaması IFFT işleminin tersini yaparak modüle etmiş olduğumuz işareti tekrar elde etmemizi sağlar [1-30].

Pratik uygulamalarda taşıyıcıların birbirine dik olmasını engelleyecek faktörler vardır. OFDM’in bu zaafını aşmak için çalışmalar sürdürülmektedir [18].

2.4 Güvenlik Aralığının Eklenmesi

OFDM sisteminin en önemli avantajlarından birisi de çoklu yol gecikme yayılımına karşı etkin bir sistem olmasıdır [12-20]. Bu, semboller arası girişimi en aza indirgeyen uzun bir işaret periyoduna sahip olmasıyla gerçekleşmektedir. Giriş veri akışının N_s adet alt taşıyıcıya bölünmesi sembol süresini N_s kat azaltırken, çoklu yol gecikme yayılımı da aynı oranda azalır. Ayrıca iletilen işaretler dairesel olarak genişletilerek semboller arası girişim hemen hemen yok edileceğinden, OFDM sisteminin çoklu yol gecikme yayılımına karşı direnci artırılabilir. OFDM sembollerine eklenen güvenlik aralığı beklenen gecikme yayılımından daha büyük seçilir. Böylece çoklu yol etkilerinden dolayı, bir sembolle bundan sonra gelen bir sonraki sembolle etkileşmesi önlenir.

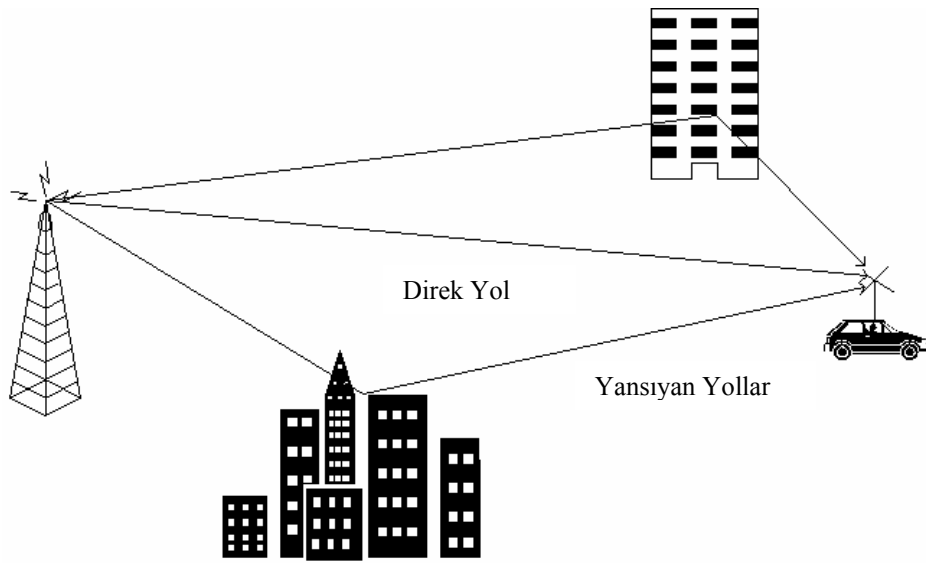
2.5 Çoklu Yol Yayılım Etkisi

OFDM’in temel prensibi yüksek hızlı veri akışını belli sayıda alt taşıyıcı üzerinden eş zamanlı olarak ileten daha düşük hızlı veri akışına bölmektir. Daha düşük hızlı paralel alt taşıyıcılar için sembol süresi arttığından çok yollu gecikme yayılımı nedeniyle zamanda meydana gelen saçılmanın miktarı göreceli olarak azalır.

İşte OFDM tekniğinin avantajlarından biride çok yollu yayılım gecikmesine karşı sistemin cevabıdır. Şekil 2.8’de çoklu yollardan yansıyan işaretler görülmektedir. Normal bir radyo veri iletişiminde kanalın tayf cevabı düz değildir. Cevaba göre alıcıda kimi frekansların iptal olmasına neden olabilecek sönümlenmeler ve boşluklar

oluşabilir. Dar bant iletişimde frekans cevabında boşluklar oluşursa bütün işaret yitirilebilir.

Çoklu yol yayılımı gecikmesi semboller arası girişime sebep olabilir. Bu, gecikmiş bir çok yollu işaretin bir sonraki işaret ile üst üste gelmesinden kaynaklanır. Bu sorun her kanala bir güvenlik gecikmesi eklenerek çözülebilir.

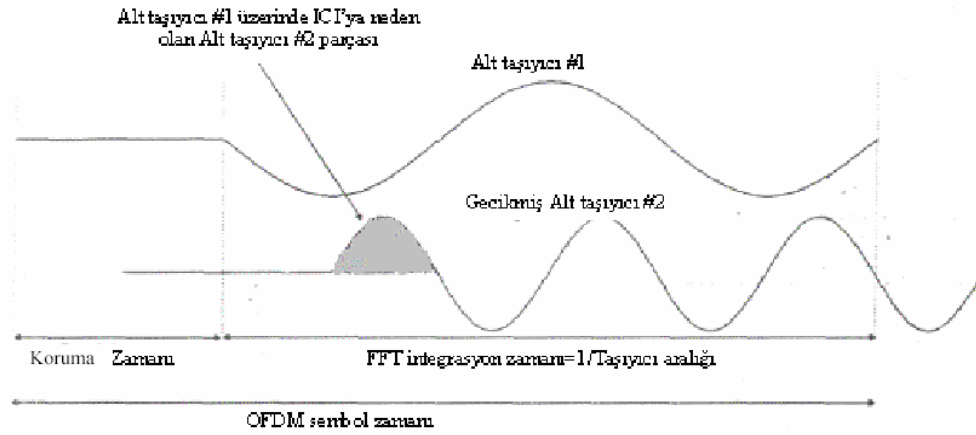


Şekil 2.8. Çoklu Yol İşaretleri

Her bir OFDM sembolünde bir güvenlik aralığını tanıtarak semboller arası girişim nerdeyse tamamen yok edilir. Güvenlik aralığında, taşıyıcılar arası girişimden kaçınmak için OFDM sembolü periyodik olarak uzatılır.

OFDM'in çok yollu yayılım gecikmesine karşı başarılı olduğunu daha önce belirtmiştik. Giriş veri akışını N alt taşıyıcıya bölmekle sembol süresini, göreceli çoklu yol gecikme yayılımını, göreceli sembol zamanını N kat azaltmış oluyoruz. Semboller arası girişimi tamamen yok etmek için her OFDM sembolü için bir güvenlik gecikmesi tanımlıyoruz. Güvenlik gecikmesini beklenen yayılım gecikmesinden daha büyük seçersek sembole ait çok yol parçaları bir sonraki işaretle girişim oluşturmaz.

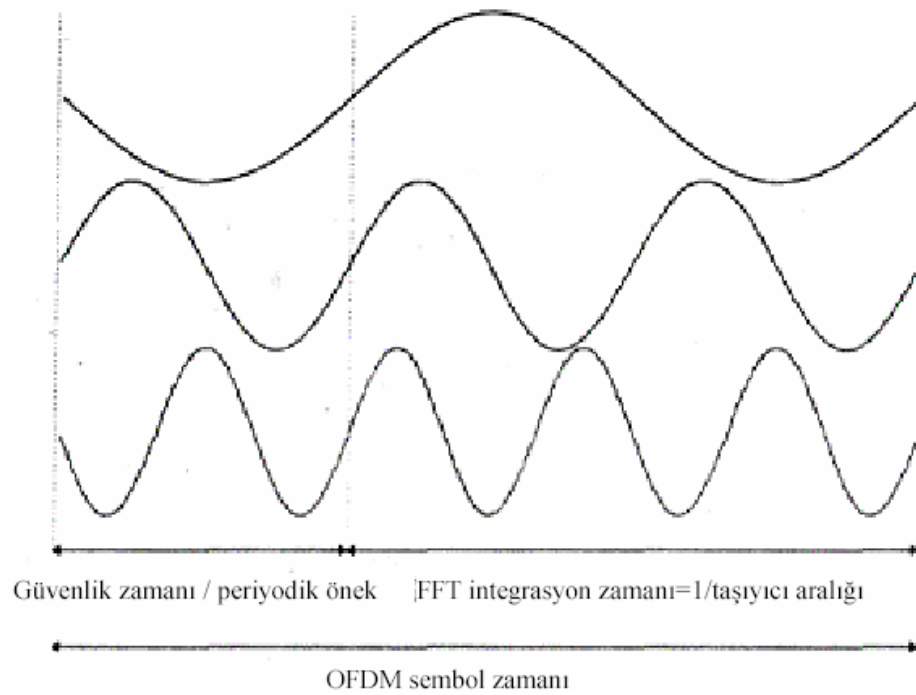
Güvenlik aralığı, işaret bozulmadan meydana getirilebilir. Fakat bu durumda da taşıyıcılar arası girişim (ICI) problemi ortaya çıkar. ICI farklı taşıyıcıların artık dik kalamayacakları anlamına gelir. Buna da çapraz karışma denir. Bu etkiyi Şekil 2.9’da görebiliriz.



Şekil 2.9. Güvenlik aralığı ve çoklu yol etkisi

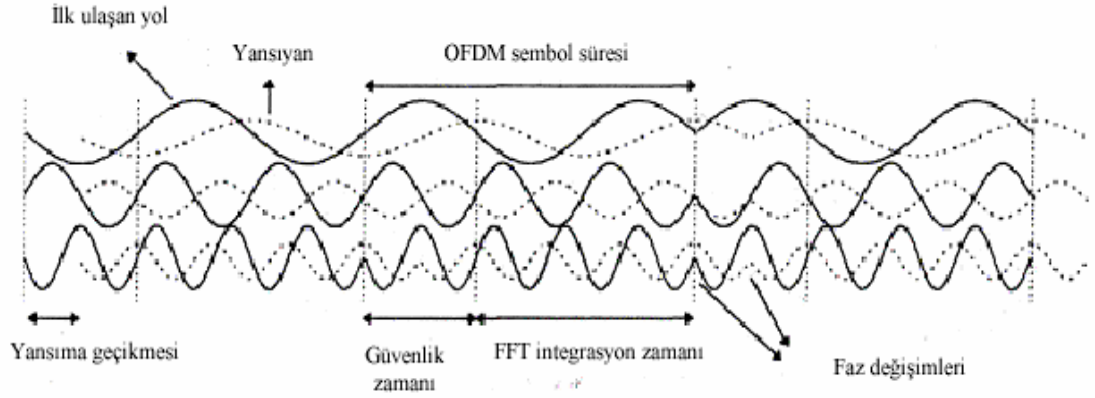
OFDM alıcısı ilk alt taşıyıcıyı demodüle etmeye çalıştığında ikinci alt taşıyıcıdan dolayı girişimle karşı karşıya kalacaktır. Çünkü FFT aralığında 1. ve 2. alt taşıyıcılar arasındaki periyot farkı tamsayı olmayacaktır. Aynı zamanda aynı sebepten dolayı ilk alt taşıyıcıdan da ikinci alt taşıyıcıya çapraz karışma olacaktır.

ICI etkisini ortadan kaldırmak için OFDM sembolü Şekil 2.10’ de görüldüğü gibi periyodik olarak uzatılır. Gecikme, güvenlik aralığından küçük olduğu sürece FFT aralığında geciken OFDM sembol kopyalarının tam sayılı periyotlara sahip olmasını garanti eder. Sonuç olarak güvenlik aralığından küçük gecikmeli çok yollu işaretler ICI’ya sebep olmazlar.



Şekil 2.10. Güvenlik aralığı ile birlikte OFDM sembolü

Çok yolluluğun OFDM'i nasıl etkilediğini, Şekil 2.11'deki iki yollu kanalda alınan işaretler göstermektedir. Noktalı eğriler kesintisiz eğrinin gecikmiş kopyasıdır. Üç sembol süresinde üç ayrı alt taşıyıcı gösterilmiştir. Gerçekte bir OFDM alıcısı sadece bunların toplamını görür fakat bu şekilde ayrı göstererek çoklu yolun etkisi daha açık görülmektedir. Şekilden, OFDM alt taşıyıcıların işaret sınırlarında 180 derecelik atlama olabilen BPSK modeli olduğu görülebilir. Noktalı eğri için bu faz atlaması ilk yoldan sonra belirli bir aralıkta gerçekleşir. Bu özel örnekte, çoklu yol gecikmesi güvenlik aralığından daha küçüktür. Bu da FFT aralığında faz değişiminin olmadığı anlamına geliyor. Böylece bir OFDM alıcısı fazı biraz kaymış saf bir sinüs dalga görür. Bu toplam alt taşıyıcılar arasındaki dikliği bozmaz, sadece alt taşıyıcılar için farklı faz kaymaları ortaya koyar.

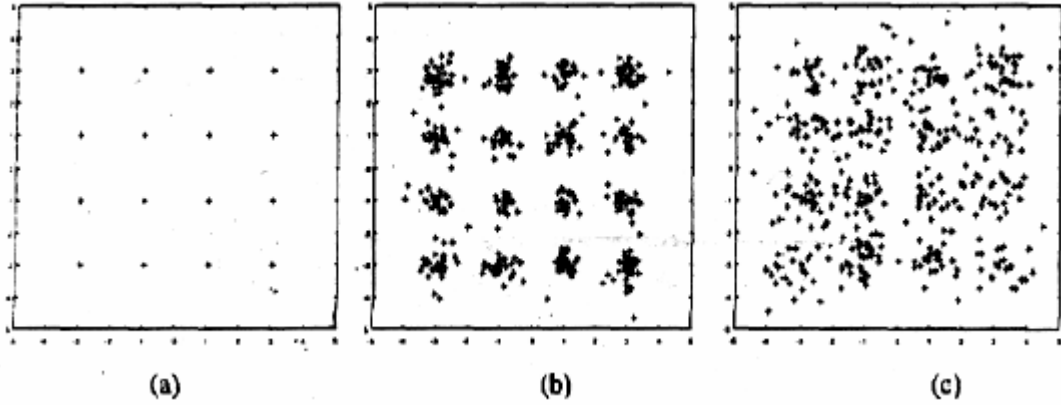


Şekil 2.11. İki yollu kanalda üç alt taşıyıcıya sahip bir OFDM işaret örneği. Kesik çizgi ile gösterilen gecikmiş çoklu yol ögesidir.

Eğer çoklu yol gecikmesi güvenlik aralığından daha büyük ise dik olma durumu kaybedilir. Bu durumda faz geçişleri taşıyıcıdaki FFT aralıklarına düşecektir. İlk yoldaki sinüs dalgalarıyla diğer gecikmeli yoldaki faz modüleli dalganın toplamı artık dik olan saf sinüs dalgası vermeyecektir, belirli bir seviyede girişimle sonuçlanacaktır.

Çok yollu gecikme, güvenlik aralığını aştığı zaman hangi seviyede girişim olacağı hakkında fikir edinmek için Şekil 2.12 her biri 16 QAM kullanılarak modüle edilmiş 48 alt taşıyıcılı OFDM tekniğinde elde edilmiş üç konstelasyon diyagramı gösterilmiştir. Şekil 2.12 (a) çoklu yol gecikmesi güvenlik aralığından küçük olduğunda bozulmamış 16 QAM konstelasyonunu gösterir. Şekil 2.12 (b) ise çoklu yol gecikmesi, güvenlik aralığını FFT aralığının %3'ü kadar aşıyor.

Bundan dolayı alt taşıyıcılar artık dik olamazlar fakat girişim hala makul alınan yıldız kümesi elde etmek için küçük durumdadır. Şekil 2.12 (c) de ise çoklu yol gecikmesi güvenlik aralığını FFT aralığının %10'u kadar aşıyor. Bu durumda girişim büyük boyuttadır ve yıldız kümesi ciddi bulanıklaşmıştır. Bu nedenle kabul edilemez bir hata oranına sebep olmaktadır.



Şekil 2.12. İki yönlü kanalda 48 alt taşıyıcılı OFDM işaretinin 16-QAM konstelasyonu
 (a) gecikme < güvenlik aralığını (b) gecikme güvenlik aralığını FFT aralığının %3'ü kadar aşıyor. (c) gecikme güvenlik aralığını FFT aralığının %10'u kadar aşıyor.

OFDM sistem tasarımında alt taşıyıcıların sayısı, güvenlik aralığı, sembol süresi, alt taşıyıcı aralığı, alt taşıyıcı başına modülasyon tipi ve ileri hata düzeltme kodlaması tipi gibi parametreler göz önüne alınmalıdır. Parametrelerin seçimi elde edilebilen bant genişliği, gerekli bit hızı, tolere edilebilen gecikme yayılması ve doppler değerleri gibi sistem gereksinimleri tarafından etkilenir. Bazı gereksinimler birbirini ters yönde etkiler. Örneğin iyi bir gecikme yayılması toleransı elde edebilmek için küçük alt taşıyıcı aralıklı çok sayıda alt taşıyıcı istenir. Fakat bunun tam tersi Doppler yayılması ve faz gürültüsüne karşı iyi bir tolerans elde etmek için yararlı olacaktır.

2.6 OFDM Sistem Parametrelerinin Seçimi

Değişik OFDM parametrelerinin seçiminde, sıklıkla birbiriyle çelişen gereksinimler arasında bir özünleşim yapılması gerekir. Parametre seçimine genellikle üç ana gereksinimle başlanması gerekir ki bunlar; bant genişliği, bit hızı ve gecikme yayılımıdır [1, 8]. Gecikme yayılımı, doğrudan güvenlik bandının yönlendirmektedir. Kural gereği güvenlik bandının, gecikme yayılımının karekök ortalamasının iki-dört katı civarından olması gerekmektedir. Bu değer, kodlama tipine ve QAM modülasyon tipine bağlıdır. Yüksek dereceli QAM (64 QAM gibi) ICI ve ISI'ya karşı QPSK'dan daha hassas iken, yüksek seviyedeki kodlama bu tarz parazite karşı

duyarlılığı belirgin bir şekilde azalmaktadır. Gecikme yayılımı ile ilgili gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra güvenlik süresi ve buna bağlı olarak da sembol süresi belirlenir. Güvenlik bandının sebep olduğu işaret gürültü oranı kaybını minimize etmek için sembol süresinin güvenlik bandından oldukça geniş olması istenmekle beraber bu genişlik keyfi olarak belirlenmemelidir çünkü daha geniş sembol süresi daha küçük alt taşıyıcı, daha fazla uygulama karışıklığı ve faz gürültüsü ile frekans dengelemesine kaşı daha fazla duyarlılık aynı zamanda da yüksek tepe gücü/ortalama güç (PAR) anlamına gelmektedir. Bundan dolayı, pratik bir tasarım seçeneği işaret süresini güvenlik bandının en az beş katı yapmaktadır ki, bu güvenlik bandından dolayı 1dB SNR kaybı anlamına gelmektedir [12] .

Sembol süresi ve güvenlik bandı belirlendikten sonra gereksinimleri alt taşıyıcı sayısı izler.-3 dB bant genişliği alt taşıyıcı aralıkları ile bölünür ki, bu işaret süresinin tersi olup güvenlik bandından küçüktür. Alternatif olarak gerekli bit hızının alt taşıyıcı başına bölünmesiyle de alt taşıyıcıların sayısı belirlenmektedir. Alt taşıyıcı başına bit hızı; modülasyon tipi (örneğin 16 QAM) ,kodlama oranı ve sembol hızı vasıtasıyla tanımlanmaktadır.

Örnek olarak aşağıdaki gereksinimler ile bir sistem tasarlanmak istendiğinde;

- Bit hızı 20 Mbps
- Tolere edilebilir gecikme yayılımı: 200ns
- Bant genişliği <15 Mhz

200 ns'lik gecikme yayılımı gereksinimi, güvenlik bandı için 800 ns'nin güvenilir bir değer olduğunu ifade etmektedir. OFDM sembol süresinin, güvenlik bandının 6 katı seçilmesiyle (4,8µs) güvenlik bandı kaybı 1 dB daha aşağı bir değere çekilebilir. Bu durumda, alt taşıyıcı aralığı da 4,8-0,8=4 µs'nin tersi olup 250 KHz'dir. Gereken alt taşıyıcı sayısı ise, gerekli bit hızının OFDM sembol hızına oranıdır. 20Mbps bit hızına ulaşmak için her OFDM işareti 96 bitlik bilgi taşımalıdır. (96/4,8µs=20Mbps). Bunu gerçekleştirmek için birkaç seçenek vardır. İlki işaret ve alt taşıyıcı başına 2 bit elde etmek için kodlama oranı 1/2 ile 16 QAM'i birlikte kullanmaktadır. Bu durumda işaret başına gereken 96 biti elde etmek için 48 alt taşıyıcı başına 1,5 bit veren 3/4 kod oranlı

QPSK kullanmaktadır. Bu durumda işaret başına 96 bite ulaşmak için 64 alt taşıyıcı gereklidir. Bununla birlikte 64 alt taşıyıcı $64 \times 250 \text{ KHz} = 16 \text{ MHz}$ bant genişliği anlamına gelip, hedeflenen bant genişliğine ulaşmak için, 60' dan az olması gerekir. Bundan dolayı 48 alt taşıyıcı ve 16 QAM 'lı ilk seçenek bütün gereksinimleri karşılamaktadır [12].

Parametre seçimini etkileyebilecek ek bir gereksinim de FFT/IFFT aralığı ile işaret (sembol) aralığının her ikisinde de örnek sayısının tamsayı olmasının istenmesidir. Örneğin yukarıdaki örnekte alt taşıyıcılar arasındaki dikliği korumak için FFT/IFFT aralığında tam olarak 64 örneğin olması istenir. Örnekleme hızının, $64/4 \mu\text{s} = 16 \text{ MHz}$ yapılmasıyla bu gerçekleştirilir. Bununla birlikte bu belirli örnekleme hızı için $4,8 \mu\text{s}$ 'lik sembol aralığında örnek sayısı tam sayı değildir. Bu problemin tek çözümü tamsayı zorunluluğunu sağlayabilmek için parametrelerden birisini biraz değiştirmektir. Örneğin sembol başına örnek sayısı, örnekleme hızı olarak $78/4,8 \mu\text{s} = 16,25 \text{ MHz}$ 'i veren 78 olarak belirlendiğinde, artık FFT aralığı $64/16,25 \text{ MHz} = 3,98 \mu\text{s}$ olacağı için $4 \mu\text{s}$ 'lik orijinal FFT süresinde, güvenlik bandı ve alt taşıyıcı aralığının her ikisi de biraz daha genişler.

2.7 OFDM'in Avantajları Ve Dezavantajları

OFDM iletişim şekli aşağıdaki avantajlara sahiptir.

- Çoklu yol etkisi ile etkili bir şekilde baş edebilen bir tekniktir. Verilen bir gecikme yayılımı için denkleştirici kullanan tek taşıyıcılı bir sisteme göre uygulamadaki karmaşıklığı görünür bir şekilde azaltır
- Zamanda yavaş değişen kanallarda o özel alt kanalın işaret-gürültü oranına göre alt taşıyıcı başına veri hızını ayarlayarak kapasiteyi artırabilir.
- OFDM dar bant karışmaya karşı oldukça dayanıklıdır. Çünkü böyle bir girişim alt taşıyıcının sadece küçük bir yüzdesini etkiler.

- OFDM tek - frekans ağırları yapmayı mümkün kılar. Bu da özellikle yayın uygulamaları için çekicidir.

Diğer yandan OFDM'in tek taşıyıcılı modülasyon tekniklerine göre dezavantajları şunlardır.

- OFDM frekans kaymasına ve faz gürültüsüne karşı daha fazla duyarlıdır.
- OFDM göreceli olarak büyük tepeden ortalamaya güç oranına sahiptir. Bu da RF kuvvetlendiricisinin güç etkinliğini azaltır.

3. BÖLÜM

KANAL VE KANAL DENGELEME

3.1 Giriş

Bu bölümde, kablosuz iletişim kanalları hakkında bilgi verilecektir. Literatürde, OFDM sistemlerinde pilot işaretler kullanılarak gerçekleştirilen kanal kestirimi pilot-tabanlı kanal kestirim yaklaşımlarından bahsedilecektir.

Kanal genel olarak kanal, radyo işaretinin kaynaktan hedefe ulaşınca kadar maruz kaldığı değişimler bütünü olarak tanımlanabilir. Fiziksel ortam olarak da kabul edilebilir. Geniş bantlı gezgin haberleşme sistemlerinde, radyo kanalı frekans seçicili olduğu ve zamanla değiştiği için OFDM işareti demodüle edilmeden önce dinamik kanal kestirimi gereklidir.

Kanal kestirimi, fiziksel ortamın giriş verisi üzerindeki etkilerini karakterize etme işlemidir. Kanal kestirimi, işarete gerçekte ne olduğunun matematiksel olarak kestirilmesidir. Kanal kestiriminin amacı; alıcıda, alınan işarete meydana gelen kanal etkilerinin yaklaşık olarak belirlenmesi ve semboller arası girişim gibi etkilerin ortadan kaldırılabilmesidir.

Temel olarak iki kanal kestirimi metodu vardır. Bunlar kör (blind) kanal kestirim ve deneme dizili kanal kestirimidir. Deneme dizili metotlar pilot-destekli teknikler olarak da adlandırılır. Bu teknikte, vericide işarete alıcıda da bilinen bir işaret dizisi eklenir. Bu teknik herhangi bir haberleşme sistemine kolaylıkla uygulanabilir ve günümüzde en çok kullanılan kestirim tekniğidir. En önemli dezavantajı ise bant genişliği israfına neden olmasıdır.

Kör kestirim tekniğinde ise vericide işarete herhangi bir dizi eklenmez. İletilen işaretin matematiksel özelliklerini kullanır. Bant genişliğinin sınırlı olduğu uygulamalarda kullanılır. En önemli dezavantajı hesaplama yükünün çok olmasıdır. Bundan dolayı gerçek zamanlı sistemlere uygulanması zordur.

Bu bölümde ilk olarak kablosuz haberleşme kanallarında sönümlenme kavramı ve sönümlü kanalların parametreleri açıklanacaktır. Daha sonra OFDM sistemlerinde kanal kestirimi için kullanılan pilot-destekli kestirim teknikleri anlatılacaktır.

3.2 Kablosuz İletişim Kanallarında Sönümlenme

Günümüzde iletişim sistemlerini en çok etkileyen bozucu etkenleri toplanır beyaz Gauss gürültüsü (AWGN), simgeler arası girişim (ISI), yol kaybı (path loss), gölgeleme (shadowing) ve çok yollu sönümlenme (multipath fading) olarak sıralayabiliriz. Bu bozucu etkenlerden çok yollu sönümlenme, bir işaretin vericiden alıcıya birçok yoldan ulaşması nedeni ile alıcıda elde edilen işaretin genliğinde ve fazında ani değişimlerin olmasına neden olur. Alıcıya farklı zamanlarda ulaşan birden çok işaretin girişimi sonucu meydana gelen sönümlenme günümüzde hücresel ve kişisel iletişim sistemlerinde sıkça karşımıza çıkan ve etkisinin azaltılması gereken önemli bir bozucu etkidir.

3.3 Kanal Parametreleri

Bir kanalı karakterize etmek için kullanılan bazı parametreler aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir.

3.3.1 Çok Yollu Yayılım

Sönümlenmeli bir kanala gönderilen darbe (impuls) işaretinin alıcıda ilk ve son görünümü arasındaki farka *çok yollu yayılım* (maksimum zaman gecikmesi) denilmektedir ve T_m ile gösterilmektedir [53, 54].

3.3.2 Evreuyumlu Bant Genişliği

Evreuyumlu bant genişliği, kanalın belirli bir işaretin spektral bileşenlerini yaklaşık olarak eşit kazanç ve doğrusal fazda geçirdiği frekans aralığıdır ve f_c ile

gösterilmektedir [53, 54]. Evreuyumlu bant genişliği ile çok yollu yayılım arasındaki ilişki,

$$f_c \approx 1 / T_m \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir. Başka bir ifadeyle, f_c yardımıyla işaretlerin kanalda farklı derecede sönümlenmeye uğramaları için frekanslarının ne kadar ayırık olacağı hakkında fikir edinilmektedir[54].

3.3.3 Evreuyumlu Zamanı

Evreuyumlu zamanı, T_c , kanalın darbe (impuls) yanıtının sabit kaldığı ya da yüksek ilişkiye sahip olduğu zaman aralığını ifade etmektedir. Bu durumda eğer simge süresi T_c 'den küçük olursa simgenin iletim boyunca zamanda değişmediği varsayılır [54].

3.3.4 Doppler Yayılımı

Kanalın zamanla değişim özelliğinden dolayı meydana gelen spektral genişleme Doppler yayılımı B_d ile ifade edilir. Doppler yayılımı, iletilen işaretin Doppler Spektrumunun sıfırdan farklı olduğu frekans aralığını vermektedir. Spektral genişlemenin miktarı gezgin birimin göreceli hızına, işaretin geliş açısına bağlıdır [54]. Evreuyumlu zamanı ile Doppler yayılımı arasında

$$T_c \approx 1 / B_d \quad (3.2)$$

şeklinde bir ilişki vardır.

3.4 Sönümlenmeli Kanalların Sınıflandırılması

Gezgin iletişim kanallarında oluşan sönümlenmeler iki ana başlık altında karakterize edilebilirler:

- Geniş ölçekli sönümlenme (large- scale fading) ve
- Küçük ölçekli sönümlenme (small- scale fading) [54].

3.4.1 Geniş Ölçekli Sönümlenme

Bu sönümlenme geniş alanlarda hareket sonucu ortalama işaret gücünün zayıflamasını ya da yol kaybını ifade eder. Geniş ölçekli sönümlenmede verici ile alıcı arasında

bulunan engebeli yeryüzü şekilleri ve çok katlı binalar önemli etkenlerdir. Bu tür etkenlerle meydana gelen sönümlenmelere *gölgeleme* (shadowing) denilmektedir [54].

3.4.2 Küçük Ölçekli Sönümlenme

Küçük ölçekli sönümlenme, alıcı ve verici arasındaki uzaklığın küçük değişimleri sonucu olarak işaretin genlik ve fazındaki dinamik değişimleri ifade eder. Küçük ölçekli sönümlenme, işaretin zaman yayılımı (time-spreading) ve kanalın zamanla değişim özelliğinden kaynaklanmaktadır [53]. İşaret parametreleri (bant genişliği, simge periyodu, v.s) ve kanal parametreleri arasındaki ilişkiye göre kanaldan iletilen her farklı işaret farklı sönümlenmeye uğrayacaktır [54]. Çok yollu yayılım, zaman yayılımı ve frekans seçici sönümlenmeye yol açarken Doppler yayılımı, frekans yayılımı ve zaman seçici sönümlenmeye (time selective fading) yol açmaktadır. Bu iki yayılım mekanizmaları birbirinden bağımsızdır [54]. Şimdi, mekanizmalara göre meydana gelen sönümlenmeler incelenecektir.

3.4.2.1 Çok Yollu Yayılımın Sönümlenmeye Etkisi

Çok yollu yayılım iletilen işaretin düz (flat) ya da frekans seçici (frequency selective) sönümlenmeye uğramasına neden olur [54].

3.4.2.1.1 Düz Sönümlenme

Eğer gezgin radyo kanalı iletilen işaretin bant genişliğinden geniş, bant genişliği boyunca sabit kazanç ve doğrusal faz yanıtına sahipse alıcıdaki işaret *Düz sönümlenme*’ye uğrar. Düz sönümlenmede kanalın çok yollu yapısı iletilen işaretin spektral karakteristiğinin alıcıda aynen korunacağı anlamına gelir. Fakat, alıcıdaki işaretin gücü zamanla değişmektedir; çünkü çok sayıda yolun etkisiyle kanalın kazancında değişimler olmaktadır [53].

Düz sönümlenmeli kanallar “genlik değiştiren kanallar” olarak bilinir ve kanala gönderilen işaretin bant genişliği kanalın bant genişliğinden çok daha dar olduğundan “dar bantlı kanallar” olarak da bilinmektedirler. Düz sönümlenmeli kanallar derin sönümlenmelere neden olurlar, bunun için sönümlenme olmayan kanallara oranla daha

düşük bit hata olasılığı elde etmek için gönderilecek işaretin gücü 20 dB ya da 30 dB fazla olmalıdır [54]. Özetlenecek olursa bir işaretin düz sönümlenmeye uğraması için,

$$B_s \ll B_c, T_s \gg \sigma \quad (3.3)$$

olmalıdır. Burada T_s , işaretin simge periyodu; B_s , işaretin bant genişliği; σ , kanalın gecikme yayılımı; B_c , kanalın evreuyumlu bant genişliğidir.

3.4.2.1.2 Frekans Seçici Sönümlenme

Eğer, kanal iletilen işaretin bant genişliğinden daha dar bir bant genişliği boyunca sabit kazanç ve doğrusal faz yanıtına sahipse bu kanal *frekans seçici sönümlenmeli* kanaldır. Bu durumda kanalın darbe yanıtı iletilen işaretin simge periyodundan daha büyük çok yollu yayılıma sahiptir. Bu şekilde alıcıdaki işaret gönderilen işaretin zayıflamış ve zamanda gecikmiş bir çok bileşeninden oluşacaktır ki bu durumda alıcıda işaret bozulmaya uğramış olur. Frekans seçici sönümlenme iletilen simgelerin kanal içinde zaman yayılımına uğramalarından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden bu kanallar simgeler arası girişime (ISI) neden olurlar [54].

Frekans seçici sönümlenmede iletilen işaretin bant genişliği kanalın bant genişliğinden büyüktür. Yine, frekans seçici sönümlenme çok yollu gecikmelerin iletilen simgenin periyodunu geçmesi sonucu meydana gelir. Özetlersek, frekans seçici sönümlenme durumu için,

$$B_s > B_c, T_s < \sigma \quad (3.4)$$

olmalıdır.

3.4.2.2 Doppler Yayılımı Sonucu Oluşan Sönümlenmeler

Doppler yayılımı sonucu oluşan sönümlenmeler hızlı sönümlenme ve yavaş sönümlenme olarak ikiye ayrılır.

3.4.2.2.1 Hızlı Sönümlenme

İletilen temelbant işaretin değişim hızının kanalın değişim hızına göre ne kadar hızlı olduğu kanalın “Hızlı sönümlenmeli” ya da “Yavaş sönümlenmeli” kanal olduğunu

belirler. Hızlı sönümlenmeli kanalda kanalın darbe yanıtı bir simge periyodu boyunca çok hızlı değişir. Bu durum kanalın evreuyumlu zamanının iletilen işaretin simge periyodundan daha küçük olduğu anlamına gelmektedir. Bu kanal türünde Doppler yayılımından dolayı frekans yayılımı meydana gelir ve işaret bozulmalarına neden olur [53]. Hızlı sönümlenme şu durumlarda meydana gelir,

$$T_s > T_c, B_s < B_d \quad (3.5)$$

Bir kanalın hızlı ya da yavaş sönümlenmeli kanal olması bu kanalın düz ya da frekans seçici sönümlenmeli kanal olduğunu belirtmez. Hızlı sönümlenme sadece kanalın hareket sonucu değişme oranı ile ilgilidir. Düz sönümlenmeli kanalda ise kanalın darbe yanıtının sadece bir delta işlevi (gecikmesiz) olduğunu düşünebiliriz. Bundan dolayı, *düz, hızlı sönümlenmeli kanal* delta işlevi genliğinin değişimi iletilen temel bant işaretin değişim oranından daha hızlı olduğu kanaldır. *Frekans seçici, hızlı sönümlenmeli kanalda* ise her birçok yollu elemanın zaman gecikmesinin, genliğinin ve fazının değişimi iletilen işaretin değişim oranından hızlıdır [54].



Şekil 3.1 Küçük ölçekli sönümlenme çeşitleri

3.4.2.2.2 Yavaş Sönümlenme (Slow Fading):

Yavaş sönümlenmeli kanalda kanalın darbe yanıtı iletilen temelbant işaretin değişimine göre daha yavaş değişmektedir. Bu durumda kanalın birkaç simge periyodu boyunca sabit olduğu düşünülebilir. Frekans bölgesinde, kanalın Doppler yayılımı temelbant işaretin bant genişliğinden çok küçüktür [54]. Yavaş sönümlenme şu koşullarda meydana gelir,

$$\begin{aligned} T_s &\ll T_c \\ B_s &\gg B_d \end{aligned} \quad (3.6)$$

Gezgin birimlerin hızları ve temel bant işaretin karakteristiği iletilen işaretin hızlı ya da yavaş sönümlenmeye uğrayıp uğramayacağını belirler [54]. Şekil 3.1’de küçük ölçekli sönümlenme durumları gösterilmiştir.

3.5 Rayleigh ve Rician Dağılımları

3.5.1 Rayleigh Dağılımı

Gezgin radyo kanallarında Rayleigh dağılımı düz sönümlenmeye uğramış işaretin alıcıdaki zarfının istatistiksel olarak zamanla değişimini tanımlamakta kullanılmaktadır. Gürültü işaretinin dik bileşenleri Gauss dağılımlı olup zarfı Rayleigh dağılımını vermektedir [54]. Rayleigh dağılımı aşağıdaki olasılık yoğunluk işlevine (pdf) sahiptir,

$$P_{Rayleigh}(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) & 0 \leq r \leq \infty \\ 0 & r < 0, \end{cases} \quad (3.7)$$

burada σ^2 , dik bileşenlerin ortalama gücüdür. Rayleigh dağılımının ortalama değeri,

$$r_{mean} = E[r] = \int_0^{\infty} r p(r) dr = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} = 1.2533\sigma \quad (3.8)$$

olarak bulunur. Rayleigh dağılımının varyansı ise

$$\begin{aligned}
\sigma_r^2 &= E[r^2] - E^2[r] = \int_0^\infty r^2 p(r) dr - \frac{\sigma^2 \pi}{2} \\
&= \sigma^2 \left(2 - \frac{\pi}{2} \right) = 0.4292 \sigma^2
\end{aligned} \tag{3.9}$$

şeklinde bulunur.

3.5.2 Ricean Dağılımı

Küçük ölçekli sönümlenmeli kanalın genlik zarfı, baskın zayıflamamış bir işaret bileşeni varsa (Line-of-side gibi) Ricean dağılımlıdır [54]. Zarf sezici çıkışında baskın işaret doğru akım bileşeninin oluşmasına neden olur. Ricean dağılımında baskın işaret bileşeni sönümlenirse Rayleigh dağılımı elde edilir [54]. Ricean dağılımı şöyledir,

$$p_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{(r^2 + A^2)}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right), \quad A \geq 0 \text{ ve } r \geq 0 \tag{3.10}$$

A , baskın işaretin maksimum değeri (genliği); $I_0(\cdot)$, 0. derece 1. çeşit Bessel işlevidir. Ricean dağılımı genellikle K parametresi ile ifade edilir. K parametresi şu şekilde hesaplanır,

$$K(dB) = 10 \log \frac{A^2}{2\sigma^2} dB \tag{3.11}$$

$A \rightarrow 0, K \rightarrow -\infty dB$ durumunda Ricean dağılımı Rayleigh dağılımına dönüşür. $K \gg 1$ durumunda ise Ricean dağılımı Gauss dağılımına yakınsar [54].

3.6 Kanal Kestirim Teknikleri

Geniş bantlı gezgin haberleşme sistemlerinde, frekans seçicili olan ve zamanla değişen radyo kanalları üzerinden iletilen OFDM işaretleri demodüle edilmeden önce dinamik kanal kestirimi yapılmalıdır. Kanal kestirimi en çok kullanılan iki teknik vardır. Bunlar deneme-dizili ve kör tekniklerdir [6-7].

Pilot destekli kanal kestirim iki şekilde gerçekleştirilebilir [6]. Pilot işaretler ya belirli bir periyoda sahip OFDM sembollerinin bütün alt taşıyıcıları içerisine yerleştirilir ya da her bir OFDM sembolü içerisine yerleştirilir. Bu metotlardan birincisi blok tip pilot kanal kestirimi olarak adlandırılır ve yavaş sönmelenmenin olduğu kabul edildiği durumlarda kullanılır. Bu durumda kanalın transfer fonksiyonunun çok hızlı değişmediği kabul edilir. Blok tip pilot kanal kestirimi En Küçük Kareler (Least Square: LS) veya Minimum Ortalama Karesel Hata (Minimum Mean Square Error: MMSE) kullanılarak gerçekleştirilir [6].

Bu metotlardan ikincisi ise birleşik tip pilot kanal kestirimi olarak adlandırılır [6, 7]. Bu teknik, kanal iki OFDM bloğun arasında dahi değiştiği durumlarda kullanılır. Birleşik tip pilot kanal kestirimi, pilot frekanslarda kanalı kestirmek ve aradeğerlemek için bir algoritma içerir. Pilot frekanslarda birleşik tipe dayalı kanal kestirimi de LS ve MMSE kullanılarak gerçekleştirilebilir [6-9].

3.6.1 Blok Tip Pilot Yerleşimine Dayalı Kanal Kestirimi

Blok tip (block-type) pilot yerleşimine dayalı kanal kestiriminde, alt taşıyıcıların pilot işaret olarak kullanıldığı OFDM kanal kestirim sembolleri periyodik olarak gönderilir. Kestirim, LS veya MMSE kullanılarak gerçekleştirilebilir [6]. Şekil 3.2’de blok tip pilot işaretlerin yerleşimi görülmektedir.

Eğer zaman domenli kanal vektörü h , Gauss ise ve kanal gürültüsü W ile ilintisiz ise h ’ın frekans domenli MMSE kestirimi aşağıdaki ifadeyle elde edilir.

$$H_{MMSE} = FR_{hY}R_{YY}^{-1}Y \quad (3.12)$$

Bu ifadede R_{hY} , h ile Y arasındaki çapraz kovaryans matrisi ve R_{YY} , Y ’nin oto-kovaryans matrisidir.

$(Y - XFh)^H (Y - XFh)$ çarpımını minimize eden LS kestirimi aşağıdaki ifadeyle elde edilir.

$$H_{LS} = X^{-1}Y \quad (3.13)$$

Kanal, yavaş sönümlenmeli olduğunda blok içindeki kanal kestirimi, karar geri beslemeli dengeleyici kullanılarak her bir alt taşıyıcıda güncellenebilir [6]. k . alt taşıyıcı için karar ger beslemeli dengeleyici aşağıdaki gibi açıklanabilir.

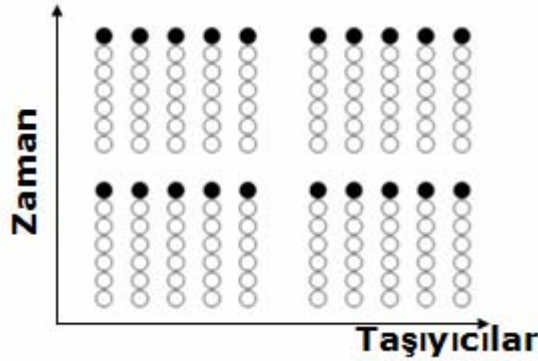
- Bir önceki sembolden kestirilen k . alt taşıyıcıdaki $\{H_e(k)\}$ kanal cevabı, $\{X_e(k)\}$ kestirilmiş iletilen işareti bulmak için kullanılır.

$$X_e(k) = \frac{Y(k)}{H_e(k)}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.14)$$

- $X_e(k)$, işaret eşlemeyici (signal demapper) kullanılarak ikilik bilgiye dönüştürülür ve daha sonra işaret eşleyici üzerinden $X_{yala}(k)$ elde edilir.
- Kestirilen $H_e(k)$ kanalı aşağıdaki ifade kullanılarak güncellenir.

$$H_e(k) = \frac{Y(k)}{X_{yala}(k)}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.15)$$

Karar geri beslemeli dengeleyici kestirimin doğru olduğunu kabul ettiği için, hızlı sönümlenme kestirilen kanal parametrelerinin tamamının kaybolmasına neden olur.



Şekil 3.2. Blok tip pilot işaretlerin yerleşimi

3.6.2 Birleşik Tip Pilot Yerleşimine Dayalı Kanal Kestirimi

Birleşik tip pilot yerleşimine dayalı kanal kestiriminde, N_p adet pilot işaret aşağıdaki ifadeye ağırlık olarak $X(k)$ işaretleri içerisine düzgün olarak yerleştirilir [6]. Şekil 3.3 Birleşik tip pilot işaretlerin yerleşimi görülmektedir.

$$X(k) = X(mL + l) = \begin{cases} x_p(m), & l = 0 \\ \text{inf.ver.}, & l = 1, \dots, L-1 \end{cases} \quad (3.16)$$

Bu ifadede $L = \text{taşıyıcı sayısı} / N_p$ ve $x_p(m)$ m. pilot taşıyıcı değeridir. LS kestirimine dayalı birleşik tip pilot yerleşimli kanal kestirimi,

$$H_e = \frac{Y_p}{X_p}, \quad k = 0, 1, \dots, N_p - 1 \quad (3.17)$$

ifadesiyle elde edilir. Burada $Y_p(k)$, k. pilot alt taşıyıcının çıkışı ve $X_p(k)$, k. pilot alt taşıyıcının girişidir.

LS kestirimi taşıyıcılar arası girişime ve gürültüye karşı hassas olduğundan, karmaşık olmasına rağmen MMSE kestirimi tavsiye edilir [6].



Şekil 3.3 Birleşik Tip Pilot İşaretlerin Yerleşimi

4. BÖLÜM

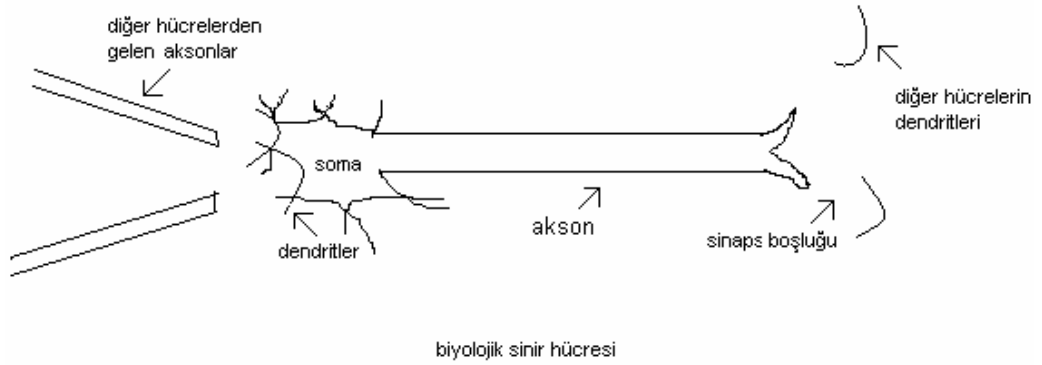
YAPAY SİNİR AĞLARI

4.1 Giriş

Yapay sinir ağı, biyolojik sinir ağına benzer şekilde, belirli bir performans karakteristiğine sahip bilgi işleme sistemidir. Yapay sinir ağları, sinir biyolojisinin matematik modelleri genelleştirilerek aşağıdaki temeller üzerine geliştirilmiştir [62-65].

- Bilgi işleme, hücre(neuron) adı verilen basit elemanlar üzerinde gerçekleşir.
- Sinyaller, hücreler arası bağlantılar üzerinden, bir hücreden diğerine geçer.
- Tipik bir sinir ağında, her bir bağlantı bir ağırlığa sahiptir ve bu ağırlık bağlantı üzerinden geçen sinyalin çarpanıdır.
- Her bir hücre kendi çıkışı belirlemek için net girişlerine, genellikle doğrusal olmayan bir aktivasyon fonksiyonu uygular.

Beyin veya sinir hücresi ile işlem birimi (yapay hücre) yapıları arasında çok yakın bir benzetim vardır. İşlem birimi yapısının anlaşılabilmesi açısından, biyolojik hücre üç temel bileşene ayrılmıştır: dendritler, soma (çekirdek) ve akson. Biyolojik sinir hücresinin yapısı Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Dendritler diğer hücrelerden gelen sinyalleri almaktadırlar. Sinyaller, sinaps (synaps) boşluğundan kimyasal işlemler aracılığı ile geçen elektriksel dürtülerdir (puls). Soma, dendritlerden gelen sinyalleri toplamaktadır. Yeterli giriş alındığında hücre etkinleşmekte, yani akson üzerinden diğer hücrelere sinyal göndermektedir. Genellikle, herhangi bir anda hücrenin etkin olduğu ya da olmadığı varsayılırsa, gönderilen sinyaller ikili (binary) gibi davranmış olurlar. Bununla birlikte, hücrenin etkinleşme frekansı değişkendir. Bir sinyalin belirli bir hücreden gönderilmesi, hücre akson zarının her iki tarafındaki iyon yoğunluğunun farklı olmasından kaynaklanan aksiyon potansiyeli aracılığı ile gerçekleşmektedir. Buradaki iyonlar; potasyum, kalsiyum ve klorid iyonlarıdır [9,62-64].



Şekil 4.1. Biyolojik nöron

Yapay sinir ağlarının bir başka önemli karakteristiği ise, tıpkı biyolojik sinir sisteminde olduğu gibi, hata tolerans özelliğine sahip olmasıdır. Biyolojik sinir sistemi iki çeşit hata toleransına sahiptir. Birincisi, daha önce karşılaşılmış olan sinyallerden farklı bir sinyalle karşılaşıldığında bunun fark edilmesidir [65].

İkincisi, sinir sisteminin kendisinde meydana gelen zararın tolere edilmesidir. Örneğin; insan doğduğunda yüz milyarlarca beyin hücresine sahiptir. Zamanla hücreler öldüğünde yenisi ile değiştirilememektedir. Hücre ölümü sürekli olmasına rağmen insanın öğrenmesi devam etmektedir. Böyle durumlarda, kaybedilen hücrelerin fonksiyonunu diğer hücreler üstlenmektedir. Aynı şekilde, yapay sinir ağları da küçük zararları karşılayabilecek şekilde tasarlanabilmekte, veya büyük zararlar karşısında yapay sinir ağı tekrar eğitilebilmektedir [65].

YSA'lar, biyolojik sinir sisteminin taklit edilmesiyle, oluşturulmuş yapay sinir sistemleridir. Biyolojik sinir sistemleri ile yapay sinir sisteminin benzerlikleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

YSA'nın temel işlemci elemanının doğrusal bir yapıda olmaması, bu işlemci elemanların birleştirilmesi ile oluşturulan YSA yapısının doğrusal olmayan karmaşık problemlerin çözümünde de etkili sonuçlar üretebilmesini sağlayan bir özelliktir.

Tablo 4.1. Biyolojik sinir sistemi ile YSA'ların karşılaştırılması

Biyolojik Sinir Sistemi	Yapay Sinir Sistemi
• Nöron • Dentrit • Hücre Gövdesi • Aksonlar • Sinapslar	• İşlemci Eleman • Toplama Fonksiyonu • Transfer Fonksiyonu • Yapay Nöron Çıkışı • Ağırlıklar

YSA'ların arzu edilen davranışı sergileyebilmesi için problemin yapısına göre tanımlanması gerekmektedir. Temel fikrini aldıkları biyolojik sinir sistemine paralel olarak oluşturulan YSA'ların karmaşık yapısı, bağlantıların ve ağırlık değerlerinin önceden belirlenmesini engeller. Bu nedenle YSA, istenen davranışı gösterecek şekilde ilgilenilen problemten alınan eğitim örneklerini kullanarak öğrenme işlemini gerçekleştirmek zorundadır. Bu öğrenme işlemi genel olarak tamamen bağlantı ve ağırlık değerlerinin ayarlanması şeklinde gerçekleşmektedir. Böylece YSA'ları farklı problemlere farklı çözümler sunabilen bir yapıya sahip olan ağ yapılarıdır [9].

Bu terminolojik benzerliklerle farklı yetenekleri de kazanan çok sayıda hücrenin çeşitli şekillerde birbirlerine bağlanması ile oluşan YSA modelleri paralel dağılmış bir yapıya sahip olurlar. Bu ağ yapısının sahip olduğu bilgi, ağdaki bütün bağlantılar üzerine dağıtmıştır. Böylece öğrenme işlemini gerçekleştirmiş olan bir YSA modeli biyolojik sinir sistemine benzer olarak herhangi bir bağlantının zarar görmesi hatta bazı bağlantı elemanlarının bozulması durumunda bile doğru bilgi üretebilecek bir yapıya sahip olur. Bu nedenle, geleneksel yöntemlere göre hatayı tolere etme yetenekleri son derece yüksektir [9].

YSA teknolojisi havacılık ve uzay alanında yüksek performanslı otomatik pilot geliştirme çalışmalarında, uçuş kontrol sistemlerinde ve simülasyon cihazlarında kullanılmaktadır. YSA'ları ayrıca otomotiv sektöründe oto-rehberlik geliştirme uygulamaları geliştirmede de kullanılmaktadırlar. Bankacılık alanında ise YSA'ları, kredi risk analizlerinde, kontrol ve döküman okuma uygulamalarında kullanılmaktadır. Savunma alanında YSA'larından, hedef tanıma ve izleme, silah oryantasyonu, veri

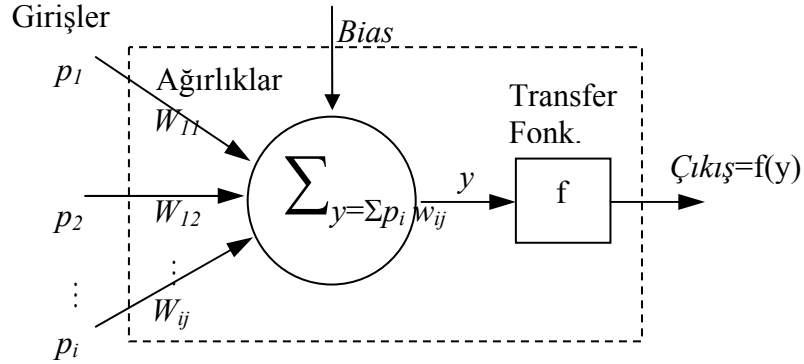
kodlama ve sıkıştırma, sayısal görüntü işleme gibi birçok alanda faydalanılmaktadır. Meteorolojik tahminlerde de yaygın olarak kullanılmaya başlanan YSA'ları elektronikte bilgisayar destekli görme, ses anlama, görüntü ve işaret işleme, ve filtreleme alanlarında da kullanılmaktadırlar. Ayrıca eğlence ve finans sektörünün yanı sıra sigortacılık, robotik, tıp, haberleşme ve diğer birçok alanda YSA'larından yaygın olarak faydalanılmaktadır [63].

4.2 Yapay Sinir Ağlarının Genel Özellikleri

Genel anlamda YSA'ları, biyolojik sinir sisteminin işlevi taklit edilerek insan beyninin modellenmesi için tasarlanmış sistemlerdir. Yapay sinir hücrelerinin birbirleri ile çeşitli şekillerde bağlanmalarından oluşan ağ yapısı genellikle katmanlar şeklinde düzenlenir. İnsan beyninin bilgi işleme yöntemine uygun olarak YSA'ları, bir öğrenme sürecinden sonra bilgiyi toplama, hücreler arasındaki bağlantı şekilleri ve ağırlıkları ile bu bilgiyi saklama ve genelleme yapabilme yeteneğine sahip paralel dağılmış bir işlemcidir. YSA'ları, insan beyninin çalışma prensibi örnek alınarak geliştirilmeye çalışılmış ve aralarında Tablo 4.1'de de verilmekte olan yapısal benzerliklere sahip bir tekniktir. Bu benzerlikleri ile YSA'ları karmaşık problemleri çözebilme yeteneğine sahip olmaktadır. YSA'larının hesaplama özelliklerini, paralel dağılmış yapılarından ve öğrenme ve genelleme yapabilme özelliklerinden aldığı söylenebilir. Genelleme yapabilme özellikleri bilinen durumlardan bilinmeyen durumlar içinde çözümler sunabilme özelliği olarak tanımlanabilir. YSA'ları doğrusal olmayan yapıları, öğrenme ve genelleme yapabilme kabiliyetleri, hataya karşı toleranslı davranabilme yetenekleri, paralel işlem yapabilmelerinden kaynaklanan hızlı ve doğru çözümler sunabilmeleri, donanım olarak gerçekleştirilebilmeleri, adaptasyon kabiliyetleri ve piyasada hazır birçok yazılım bulunması nedeniyle çok farklı mühendislik alanında başarıyla uygulanmaktadır [62-65].

YSA'ların en küçük bilgi işleme elemanı olan yapay nöron, Şekil 4.2'de verilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi bir yapay nöron, girişler, ağırlıklar, birleştirme fonksiyonu, transfer fonksiyonu ve çıkış bileşenlerinden oluşmaktadır. Girişler, diğer sinir hücrelerinden ya da dış bağlantılar üzerindeki ağırlıklardan hücreye giren verilerdir. Birleştirme fonksiyonu, yapay nörona gelen net girişin, girişlerin ilgili ağırlıklarla çarpılarak toplanmasıdır. Birleştirme fonksiyonu ile elde edilen net girişin

bir işlemten geçirilerek nöron çıkışını belirleyen ve genellikle doğrusal olmayan fonksiyon ise Transfer fonksiyonu olarak bilinmektedir [9].



Şekil 4.2. Yapay nöron

YSA modeline verilen giriş değerlerine önce toplama fonksiyonları uygulanır ve her bir nöronun çıkış değeri;

$$y = \sum p_i w_{ij} - Bias \quad (4.1)$$

ile bulunur. Burada p_i , i 'inci girişi, w_{ij} , j 'inci elemana bağlantı ağırlığını ve $Bias$ eşik değerini göstermektedir. Daha sonra bu y değerleri bir transfer fonksiyonuna uygulanır. Burada sigmoid fonksiyonu kullanıldığı kabul edilirse çıkış değeri ζ ;

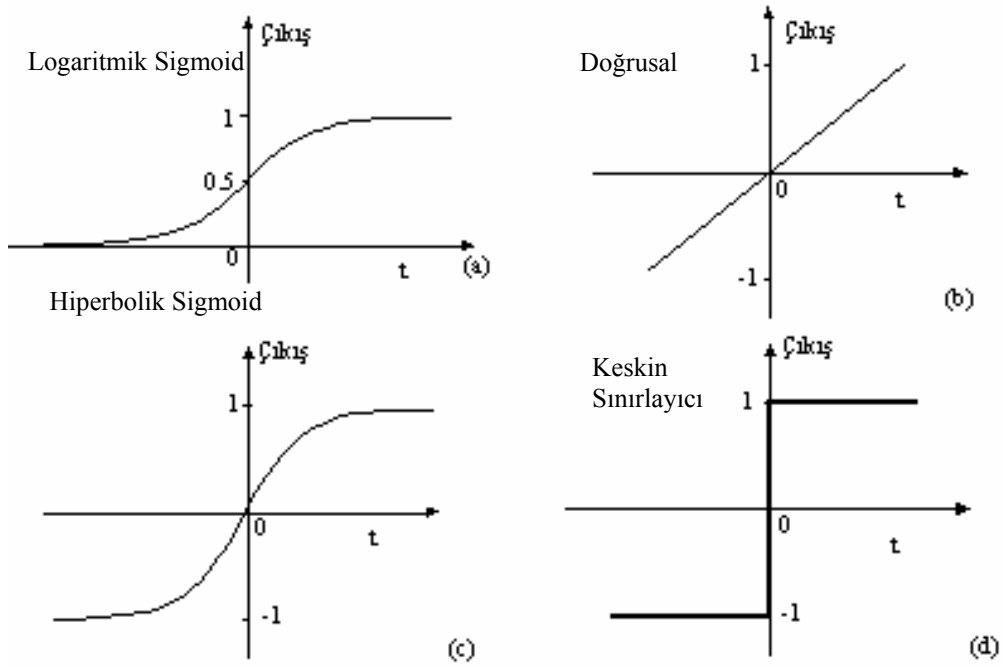
$$\zeta = f(y) = \frac{1}{1 + e^{-y}} \quad (4.2)$$

şeklinde elde edilir.

4.3 Transfer Fonksiyonları

YSA nöronları; transfer fonksiyonu adı verilen fonksiyonlar içerirler. Gradyan azaltımında kullanılan asıl fonksiyonlar transfer fonksiyonlarıdır. YSA'da en sık kullanılan transfer fonksiyonlarına ait grafikler Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Doğrusal olmayan transfer fonksiyonlarının da kullanılması ile yapay sinir ağları daha karmaşık problemlere uygulanmaya başlanmıştır [64]. Transfer fonksiyonları öğrenme eğrisi olarak da adlandırılmaktadır. Tablo 4.2'de YSA'da en çok kullanılmakta olan transfer fonksiyonlarının matematik ifadeleri verilmiştir [9].



Şekil 4.3. YSA’larda en çok kullanılmakta olan transfer fonksiyonları

Tablo 4.2. Bazı transfer fonksiyonlarının matematik ifadeleri

Fonksiyon tipi	Matematik İfadesi
Doğrusal	X
Logaritmik-Sigmoid	$\frac{1}{1 + e^{-x}}$
RBF–Cauchy	$(1+x)^{-1}$
RBF–Ters Multiquadratik	$(1+x)^{0.5}$
RBF–Gauss	$e^{\frac{-x^2}{\beta^2}}$
Hiperbolik Tanjant	$\frac{1 - e^{-2x}}{1 + e^{-2x}}$
Keskin Sınırlayıcı	$\begin{cases} 1 & x \geq x_0 \\ 0 & \text{diğer} \end{cases}$

Transfer fonksiyonları türevleri tanımlanabilir, sürekli fonksiyonlar olmalıdırlar.

4.4 YSA'ların Özellikleri

YSA'ların en önemli özellikleri; öğrenme, genelleme yapabilme, doğrusal olmama, gürültüyü yayabildiklerinden dolayı gürültüye karşı tolerans, paralel işlem yapabilme, donanım olarak gerçekleştirilebilme ve uyarlanabilirliktir [9,65].

4.4.1 Doğrusal Olmama

YSA'nın temel işlem elemanı olan nöron doğrusal olmak zorunda değildir. Bu durumda hücrelerin birleşmesinden meydana gelen YSA'da doğrusal olmayacaktır. Bu yüzden, YSA doğrusal olmayan karmaşık problemlere kolayca çözüm getirebilmektedir.

4.4.2 Öğrenme

Bir sistemin girişi ve çıkışı arasındaki ilişkiyi en iyi tanımlayacak olan YSA ağırlıklarının bulunması işlemine öğrenme denir. Bu işlemde YSA yapısı üzerindeki ağırlıkların bir öğrenme algoritması kullanılmasıyla, istenilen bağıntıyı öğrenmesi sağlanır. Bu nedenle YSA, istenen davranışı gösterecek şekilde ilişkilendirmek istenen sistemin uygun örnek giriş ve çıkışlarından faydalanılarak gerçekleştirilir.

4.4.3 Genelleme Yapabilme

YSA'ları bir problemi öğrendikten sonra eğitimde kullanılmayan test verileri içinde beklenen veya istenilen tepkiyi üretme kabiliyetine sahiptir. Nöral hesaplamada hafızalar birleşiktir. Yani eğitilmiş ağa giriş örneğinin bir kısmı verilse bile, ağ hafızadan bu girişe en yakını seçerek uygun çıkış değeri üretir. YSA'na bozuk veya eksik bir bilgi verilse bile ağ kabul edilebilir en uygun çıkışı verecektir. Burada temel özellik az veriyle sistem davranışının veya ilişkisinin öğrenilmesidir.

4.4.4 Uyarlanabilirlik

YSA'nın ağırlıkları, problemde problemde değişir. Yani bir problemde iyi çıkışlar veren ağırlıklar diğer bir problem için iyi çıkışlar vermeyebilir. YSA'ları problemlerdeki değişimlere göre farklı şekilde eğitilebilirler. Bu özellik YSA'ları ile hedef tanıma ve

izleme, uyarlamalı örnek tanıma, sınıflandırma, görüntü ve sinyal işleme, otomatik sistem kimliklendirme ve kontrol gibi alanlarda kullanım kolaylığı sağlamaktadır.

4.4.5 Donanım Olarak Gerçekleştirilebilme

YSA'ları paralel işlem yapabilme yetenekleri nedeni ile büyük ölçekli entegre devre (VLSI-Very Large Scale Integration) teknolojisiyle tarafından desteklenmektedirler. Bu özellikleri ile de YSA'lar en ileri düzeydeki veri işleme teknolojileri arasındadır. Bu nedenle hızlı işlem yapabilme kabiliyetine sahiptirler.

4.4.6 Hataya Karşı Duyarlılık

YSA'ları çok sayıda işlemci elemandan oluşmuştur. Bu elemanlar arası bağlantılar paralel dağıtılmış bir yapıya sahiptir. Ağın sahip olduğu bilgi, ağdaki bütün bağlantılara dağıtılmıştır. Giriş veri setinde bulunabilecek herhangi bir gürültü, bütün ağırlıklar üzerine dağıtıldığından dolayı, gürültü etkisi tolere edilebilir. Geleneksel yöntemlere göre hatayı tolere etme yetenekleri daha fazladır.

4.4.7 Veri İşleme

Biyolojik sistemlerde veri dağınık yapıda saklanır. Yapay sinir ağlarında ise veriler ağırlıklar üzerine dağıtılmıştır. Ağırlıklar herhangi bir anda YSA'nın problemiyle ilgili olarak sahip bulunduğu bilgiyi ifade eder. Yapay sinir ağlarında veri ağırlıklar üzerine paralel olarak dağıtılmış şekilde temsil edilmekte, korunmakta ve işlenmektedir. YSA'larında dağıtılmış birleşik hafıza yapısı kullanılır [9].

4.5 YSA'ların Sınıflandırılması

YSA'ları işlemci eleman olarak adlandırılan nöronlardan ve ağ bağlantılarından oluşmaktadırlar. Bu nedenle ağ bağlantı şekillerine, öğrenme kuralları ve transfer fonksiyonlarına göre belirlenen bu YSA modellerini yapılarına ve öğrenme algoritmalarına bağlı olarak sınıflandırmak mümkündür [9].

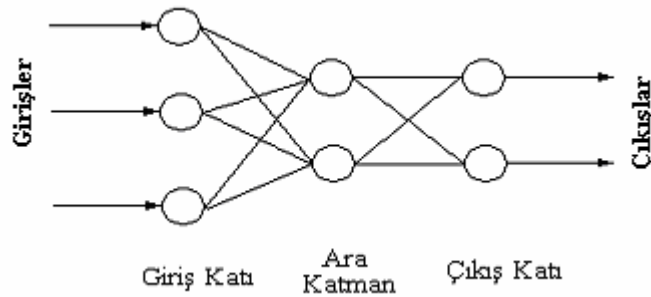
4.5.1 YSA'larının Ağ Yapılarına Göre Sınıflandırılması

YSA'ları mimari yapılarına göre ileri beslemeli (feed-forward) ve geri beslemeli (feed-back) ağlar olarak ikiye ayrılabilir [62]. Bu yapılar aşağıdaki kısımlarda açıklanmıştır.

4.5.1.1 İleri Beslemeli Ağ Yapısı

İleri beslemeli bir ağda işlemci elemanlar katmanlar üzerinde bulunur. Giriş katmanı, dış ortamdan aldığı bilgileri hiçbir değişiklik yapmadan ara katmandaki işlemci elemanlara iletir. Bilgi, ara katman veya katmanlarla çıkış katmanında işlenerek ağ çıkışına iletilir. Girişler tek yönlü olarak çıkışa doğru iletilirken, her bir katman çıkışı diğer katmana giriş olarak uygulanmaktadır. Herhangi bir andaki çıkış değeri, sadece o andaki girişin fonksiyonu şeklinde ortaya çıkmaktadır. Böylece bu ağ yapısı, statik yapıya sahip bir hafızaya sahip olur.

İleri beslemeli ağlar doğrusal olmayan bir yapıya sahip olup çok katmanlı perseptronlar (ÇKP), LVQ (Learning Vector Quantization-Nicemleme Öğrenme Vektörü) ağ yapıları bunlara örnek olarak verilebilir. ÇKP yapısının eğitilmesinde en çok kullanılan öğrenme algoritması geri yayılım algoritmasıdır. İleri beslemeli YSA yapısı Şekil 4.4'te verilmiştir.

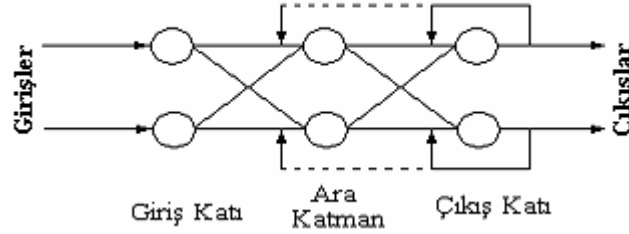


Şekil 4.4. İleri beslemeli YSA yapısı

4.5.1.2 Geri Beslemeli Ağ Yapısı

Geri beslemeli bir sinir ağı, en az bir işlemci eleman çıkışının kendisine veya diğer işlemci elemanlara bir gecikme elemanı üzerinden giriş olarak uygulanması ile elde edilen ağ yapısıdır. Geri besleme, bir katmandaki işlemciler arasında olduğu gibi katmanlar arasındaki işlemciler arasında da gerçekleştirilebilmektedir. Geri beslemeli YSA yapıları, doğrusal olmayan dinamik bir davranış gösterirler ve herhangi andaki çıkış değeri hem o andaki hem de daha önceki giriş değerlerine sahiptirler. Dinamik

yapılarından dolayı geri beslemeli YSA'lar tahmin uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadırlar. Şekil 4.5'te geri beslemeli bir YSA yapısı verilmiştir.



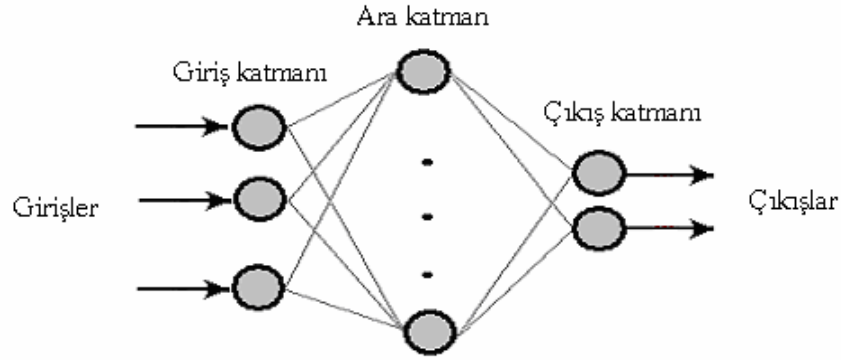
Şekil 4.5. Geri beslemeli YSA yapısı

4.6 Yapay Sinir Ağı Yapıları

Literatürde çok sayıda YSA ağ yapısı bulunmaktadır. Bunlara, ÇKP'ler, LVQ'lar, Elman ve Jordan Ağları, Radyal Tabanlı Yapay sinir ağı (RTYSA) yapıları örnek olarak verilebilir. Bu ağlardan en çok kullanılan ÇKP alt bölümde anlatılmıştır.

4.6.1 Çok Katmanlı Perseptron YSA Yapısı

Çok katmanlı bir perseptron sinir ağı modeli, Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Bu ağ modeli özellikle mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan sinir ağı modeli olmuştur. Bu modelin yaygın kullanılmasının sebebi, bir çok öğrenme algoritmasının bu ağın eğitiminde kolaylıkla kullanılabilmesidir. Bu sebeplerden dolayı bu çalışmada ÇKP YSA kullanılmıştır. Bir ÇKP modeli, bir giriş, bir veya daha fazla ara kat ve birde çıkış katından oluşur. Bir katmandaki bütün işlem elemanları bir üst katmandaki bütün işlem elemanlarına bağlıdır. Bilgi akışı ileri doğru olup geri besleme yoktur. Bu yüzden bu ağ yapısı ileri beslemeli sinir ağı modeli olarak adlandırılır. Giriş katmanında herhangi bir bilgi işleme yapılmaz. Ara katman sayısı ve ara katmanlardaki işlem elemanı sayısı genellikle deneme yanılma yoluyla bulunur. Çıkış katmanındaki eleman sayısı yine uygulanan probleme bağlı olarak belirlenebilir. ÇKP ağlarında, ağa bir örnek gösterilir ve örnek neticesinde nasıl bir sonuç türeteceği de bildirilir. Örnekler giriş katmanına uygulanır, ara katmanlarda işlenir ve arzu edilen çıkış arasındaki hata tekrar geri doğru ağırlıklar üzerine yayılarak hata minimuma düşüncüye kadar ağırlıklar değiştirilir. ÇKP ağları ileri beslemeli ağ olup, en genel sonuç çıkış katmanından elde edilir. Kullanılan eğitime algoritmasına göre ağın çıkışı ile anlamıyla giriş ile çıkış uzayı arasında statik haritalama yaparlar, bir andaki çıkış sadece o andaki girişin bir fonksiyonudur [9].



Şekil 4.6. Genel bir ÇKP Yapısı

4.7 YSA'larının Öğrenme Algoritmalarına Göre Sınıflandırılması

Öğrenme; gözlem ve eğitim sonucu oluşan hareketin doğal yapıda meydana getirdiği davranış değişikliği olarak tanımlanabilir. Bu tanıma göre, YSA'larında öğrenme yani gözlem ve eğitim sonucu oluşan davranış değişiklikleri, bir takım metot ve kurallar yardımıyla ağırlıkların değiştirilmesiyle sağlanabilir. Öğrenme sırasında, ağın uyarılması sonucunda ağırlıklarında uyarılması ve ağın problemi çözmeye yönelik yeni tepkiler vermesi gerekir.

Literatürde, YSA yapılarına göre farklılık gösteren ve aşağıdaki bölümlerde kısaca anlatılan çok sayıda öğrenme algoritması mevcuttur [62-65].

4.7.1 Geri Yayılım (BP)

Bir çok uygulamada yaygın bir şekilde kullanılmakta olan bir öğrenme algoritmasıdır. Anlaşılması ve matematik olarak kolayca ispatlanabilir olmasından dolayı tercih edilmektedir. Bu algoritma, hataları geriye doğru çıkıştan girişe azaltmaya çalışmasından dolayı geri yayılım ismini almıştır.

Bu algoritmayla, i ve j katman nöronları arasındaki ağırlık ifadesi olan $\Delta w_{ji}(k)$ değişikliği hesaplanır. Bu ifade,

$$\Delta w_{ji}(k) = \eta \delta_j x_i \quad (4.3)$$

olarak verilir. Bu eşitlik η öğrenme katsayısı, δ_j ara veya çıkış katmanındaki herhangi bir j nöronuna ait bir faktördür. Çıkış katmanı için bu faktör aşağıdaki şekilde verilir.

$$\delta_j = \frac{\partial f}{\partial net_j} (y_j^k - y_j) \quad (4.4)$$

Burada $net_j \equiv \sum x_i w_{ji}$ ve y_j^k ise j nöronunun hedef çıkışıdır. Ara katmanlardaki nöronlar için bu faktör,

$$\delta_j = \left(\frac{\partial f}{\partial net_j} \right) \sum w_{qj} \delta_q \quad (4.5)$$

olarak verilir. Ara katmanlardaki nöronlar için herhangi bir hedef çıkış olmadığından eşitlik (4.4) yerine eşitlik (4.5) kullanılır. Bu duruma bağlı olarak, çıkış katmanından başlayarak δ_j faktörü, bütün katmanlardaki nöronlar için hesaplanır. Tüm ağırlıklar eşitlik (4.3)'e bağlı olarak güncelleştirilir.

4.7.2 Momentumlu Geri Yayılım (BPM-Back Propagation Momentum)

Momentum ağırlık lokal gradyanleri aşmasını sağladığı gibi aynı zamanda hatanın hızlı düşmesine de yardımcı olur. Bir alçak geçiren süzgeç gibi davranan momentum, ağırlık hata yüzeyindeki küçük değerlerin ihmal edilebilmesini sağlar. Momentum olmaksızın ağırlık lokal bir minimuma takılarak salınımlar yapabilir. Momentum kullanılır ise ağırlık lokal minimumun diğer yüzüne sıçrama imkanı kazanır. Bu yöntemde öncelikle, öğrenilen her bir elemandan hesaplanan gradyanların toplamından toplam gradyan değeri hesaplanır ve tüm öğrenme kümesinin işlenmesi bittiğinde ağırlıklar ve bias'lar (4.6) eşitliğinde verildiği gibi güncelleştirilir.

$$\Delta w_{ji}(k) = \eta \delta_j x_i + \mu \Delta w_{ji}(k-1) \quad (4.6)$$

4.7.3 Esnek Geri Yayılım (BPR-Back Resilient Propagation)

Sinir düğümü yapısında sıklıkla sigmoid tabanlı fonksiyonlar kullanılır. Bu fonksiyonlar sonsuz giriş aralığındaki veriyi sonlu aralığa transfer ederler ve giriş değeri büyüdükçe fonksiyonlardaki eğiklik sıfıra doğru gider. Bu durum sigmoid fonksiyonlarına sahip sinir ağlarında türevdeki değişikliklerin parametre üzerindeki etkisini azaltır. Bu yüzden türevin değeri yerine yalnızca işaretine göre parametrelerin yenilenmesini sağlamak

amacıyla bu yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem önceki anlatılan yöntemden daha hızlı yakınsamaktadır.

4.7.4 Eşleştirmeli Gradyan Azaltma Geri Yayılım (CG-Conjugate Gradient)

Basit geri-yayılım algoritması ağırlık değerlerini gradyanın negatifi yönünde dengeler. Bu doğrultu gradyanın hızla düştüğü doğrultu olarak bilinir. Bu doğrultuda performans fonksiyonu da hızla düşer. Performans fonksiyonundaki hızlı düşüşe rağmen bu gelişme sonuca en hızlı yakınsama için gerekli olmayabilir. Eşleştirmeli gradyan algoritmalarında hızlı gradyan düşüş doğrultusundan genellikle daha çabuk sonuca yakınsayan eşleştirme doğrultusunda bir arama işlemi uygulanır. Bir çok eşleştirmeli gradyan algoritmasında adım boyutu her bir iterasyonda yeniden düzenlenir. Performans fonksiyonunun yakınsama doğrultusu boyunca minimize edilmesi için güncelleme adım boyutunun belirlenmesi amacıyla eşleştirmeli gradyan doğrultusu boyunca bir arama gerçekleştirilir.

4.7.5 Quasi-Newton (QN)

Newton yöntemleri hızlı optimizasyon için kullanılabilecek yöntemlerdir. Newton metodu temel olarak:

$$p_k = -A_k^{-1} g_k \quad (4.7)$$

ile ifade edilir. Burada A_k Hessian matrisidir ve ikinci derece türevlerde tanımlanır. Bu öğrenme algoritması Hessian matrisinin her iterasyonda yaklaşık değerinin hesaplanması esasına dayanır. Bir sonraki iterasyondaki Hessian matrisi ve ΔA_k :

$$A_{k+1} = A_k + \Delta A_k \quad (4.8)$$

$$\Delta A_k = \frac{g_k \cdot g_k^T}{g_k^T \cdot p_k} + \frac{\Delta g_k \cdot \Delta g_k^T}{\Delta g_k^T \Delta X_k} \quad (4.9)$$

şeklinde dir. Burada ΔX_k , k . iterasyondaki ağırlık değişimi olarak alınır. QN eşleştirmeli gradyan yöntemlerine göre çok daha fazla hafıza ve her iterasyonda çok daha fazla hesaplama gerektirse de genellikle birkaç iterasyonda sonuca erişir. Küçük boyutlu ağlarda kullanımı daha uygundur. N, ağdaki ağırlıkların ve bias'ların değerine eşit olmak üzere $n^2 \times n^2$ boyutlu tahmini Hessian matrisinin hafızada saklanması gerekir.

4.7.6 Delta-Bar-Delta (DBD)

Jacobs tarafından geliştirilmiş bir ÇKP öğrenme algoritması olan DBD'nin eğitme kuralı, ağırlıkların yakınsama hızını arttırmak için kullanılan sezgisel bir yaklaşımdır. DBD öğrenme algoritmasında, ağırlık her bir bağlantısına atanan öğrenme katsayılarının optimum değerlerinin belirlenmesi çok zor ve zaman alıcı olabilmektedir. Bu algorithmada, bir bağlantıya ait ağırlık değişim işaretinin ardışık birkaç adımı sırasıyla farklı değerler alması durumunda öğrenme oranı azaltılmalı aynı kalması durumunda ise öğrenme oranı artırılmalıdır. Bu değişimi sağlayabilmek için ağırlıklar, hatanın derecesine bağlı olan kısmi türevlerine ve ağırlık değeri noktasının çevresindeki hata yüzeyinin eğrilik ölçüsüne göre güncellenmelidir. Güncelleme işlemi,

$$w(k+1) = w(k) + \alpha(k) \cdot \delta(k) \quad (4.10)$$

eşitliği ile gerçekleştirilir. Bu ifadedeki $\alpha(k)$ öğrenme katsayısı her bir ağırlık için farklı bir değerde atanmalıdır. Her bir ağırlığın öğrenme hızının artırılması için, $\delta(k)$ eğim bileşeninin ağırlıklı ortalaması kullanılarak bulunur ve ağırlıklı ortalama değeri,

$$\bar{\delta}(k) = (1 - \theta) \cdot \delta(k) + \theta \cdot \delta(k-1) \quad (4.11)$$

eşitliği ile düzenlenebilir. Bu ifadede yer alan θ konveks ağırlık faktörüdür. Üstel olarak artan önceki eğim bileşeni ve mevcut eğim bileşeni aynı işaretli ise öğrenme katsayısı, κ sabiti ile artırılan ağırlıklı birleştirilir. Mevcut eğim bileşeni üstel ortalamasına göre zıt işaretli ise, öğrenme katsayısı mevcut değeri ile orantılı olarak azaltılır. Bu işlem,

$$\Delta\alpha(k) = \begin{cases} \kappa & \bar{\delta}(k-1) \cdot \delta(k) > 0 \\ -\varphi \cdot \kappa & \bar{\delta}(k-1) \cdot \delta(k) < 0 \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (4.12)$$

eşitliği ile gerçekleştirilebilir. Burada, κ artma faktörünü, φ azaltma faktörünü, $\delta(k)$ ise k anındaki öğrenme katsayısını göstermektedir. Bu ifadeye göre DBD algoritması, öğrenme katsayısını doğrusal olarak artırmakta, fakat geometrik olarak azaltmaktadır denilebilir.

4.7.7 Genişletilmiş Delta-Bar-Delta (EDBD-Extended Delta-Bar-Delta)

Bu algoritma isminden de anlaşılacağı gibi Jacobs tarafından sunulan DBD algoritmasının geliştirilmiş halidir. DBD algoritmasından farklılıkları; sezgisel momentum kullanması, ağırlık uzayında büyük artmaları ortadan kaldırması ve geometrik azaltımın büyük orandaki atlamalarını engellemede yeterince hızlı olmaları şeklinde sıralanabilir. EDBD’de ağırlık değişimleri,

$$\Delta w(k+1) = \alpha(k) \cdot \delta(k) + \mu(k) \cdot \Delta w(k) \quad (4.13)$$

eşitliği ile belirlenebilir. Burada $\delta(k)$, ağırlık değişiminin gradyan bileşeni, $\alpha(k)$ ve $\mu(k)$ sırasıyla öğrenme ve momentum katsayılarıdır. Ağırlıklardaki değişimin belirlenmesi ile yeni ağırlık değeri,

$$w(k+1) = w(k) + \Delta w(k) \quad (4.14)$$

şeklinde güncellenmelidir. Öğrenme katsayısındaki değişim ise,

$$\Delta \alpha(k) = \begin{cases} \kappa \cdot \exp(-\gamma_\alpha \cdot |\delta(k)|) & \bar{\delta}(k-1) \cdot \delta(k) > 0 \\ -\varphi_\alpha \cdot \kappa & \bar{\delta}(k-1) \cdot \delta(k) < 0 \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (4.15)$$

ifadesi ile verilmektedir. Bu ifadedeki κ_α öğrenme katsayısının derecelendirme sabiti, γ_α öğrenme katsayısını üstel olarak artırmada kullanılan sabiti, φ_α öğrenme katsayısının azaltma sabitidir. Ağırlık uzayında osilasyonları ve aşırı atlamaları engellemede tüm bağlantılar için $\alpha(k) \leq \alpha_{\max}$ ve $\mu(k) \leq \mu_{\max}$ değerinin sağlanması gerekmektedir. Burada $\alpha_{\max}$, öğrenme katsayısının üst sınırı ve $\mu_{\max}$, momentum katsayısının üst sınırıdır.

4.7.8 Levenberg Marquardt (LM)

Oldukça başarılı bir optimizasyon metodu olan LM algoritması, öğrenmede kullanılan geri yayılım algoritmasının farklı öğrenme tekniklerinden birisidir. Bu öğrenme algoritmasının seçilmesinin sebebi, hızlı öğrenme ve iyi yakınsayabilme özelliğinden kaynaklanmaktadır. Temel olarak LM algoritması, maksimum komşuluk fikri üzerine kurulmuş bir hesaplama metodu olup Gauss-Newton ve Steepest-Descent (adım azaltmalı) algoritmalarının en iyi özelliklerinden oluşmuştur ve bu iki metodun

kısıtlamalarını ortadan kaldırmaktadır. Performans fonksiyonu kareler toplamı biçimine sahip olduğunda Hessian matrisine;

$$H=J^T J \quad (4.16)$$

şeklinde yaklaşıklık yapılabilir ve buradan gradyan;

$$g=J^T.e \quad (4.17)$$

olarak hesaplanabilir. Eşitliklerde, J ağda yer alan ağırlık ve biaslara (yanlılık) ait hataların ilk türevlerini içeren Jacobiyen matrisidir. e ise, ağ hatalarının vektörüdür. T matris transpozisini temsil eder. Bu metot ile performans fonksiyonu algoritmanın her iterasyonunda azalan bir eğim gösterecektir ve J matrisini Hessian matrisi yerine kullanır:

$$w_{k+1}=w_k-[J^T J+\mu I]^{-1} J^T \times e \quad (4.18)$$

Eğer μ büyük ise, minimum yaklaşım adımı küçük olur. Bu yüzden, her başarılı adımda μ değeri azaltılmalıdır. Eğer performans fonksiyonu artıyorsa μ artırılmalıdır.

4.7.9 Bayesian Düzenleme (BD) Öğrenme Algoritması

Optimum düzenleme parametrelerinin otomatik bulunması arzu edilir. Bu amaçla kullanılan yöntemlerden biri Bayesian düzenleme yaklaşımıdır. Bayesian yaklaşımının ağda bulunan ağırlıklar ve bias değerleri, farklı dağılımlı değişkenler gibi düşünülür. Düzenleme parametreleri bu dağılımların birleşiminin değeri bilinmeyen varyansı ile ilişkilendirilerek tahmin edilir. Bu amaçla istatistiksel yöntemler kullanılır. Burada LM'ye benzer şekilde, J 'ler Jacobian matrisi, E hata, I birim matris ve μ momentum katsayısı olmak üzere;

$$dX=-(JX*JX+I*\mu)/(JX*E) \quad (4.19)$$

dir.

5. BÖLÜM

SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

5.1 Giriş

Yapılan simülasyon çalışmalarında OFDM sistemi, ADS (Advanced Desing System) programı kullanılarak tasarlanmıştır. Ayrıca, kanal dengeleme amacıyla geliştirilen yapay sinir ağları yazılımı MATLAB programında hazırlanmış ve bu yazılım ADS programına adapte edilmiştir. Böylece her iki programın ortak çalışması sağlanmıştır. Simülasyon çalışmalarının amacı farklı sistem parametrelerine sahip OFDM işaretleri üretmek ve farklı kanal parametreleri altında OFDM sistemini test etmektir. Bu tez çalışmasını konusu olan OFDM sistemlerinde kanal dengeleme, “YSA” yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

ADS (Advanced Desing System), ‘Agilent Technologies’ firmasının yüksek frekans Elektronik Tasarım Otomasyonu (EDA) yazılımıdır. Agilent firmasına ait RF-IC, Analog/RF ve DSP sentez simülatörlerini içinde barındırmaktadır. ADS yazılımının özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

- Son derece gelişmiş komponent ve cihaz kütüphanelerine sahiptir.
- Tasarımların ve sistemlerin karakterizasyonu ve analizi için doğrusal, doğrusal olmayan (Harmonic Balance), transient, zaman bölgesi (circuit envelope), EM, ve senkronize veri akışı (Agilent Ptolemy) simülatörlerini içermektedir.
- Optimizasyon ve istatistiksel tasarım araçları ile modern tasarım imkanları sağlamaktadır.
- Simülasyon sonuçlarını görüntülemek için esnek görüntüleme ortamına sahiptir.
- Eleman bağlantı araçları vasıtasıyla fiziksel doğrulama imkanı sağlar.

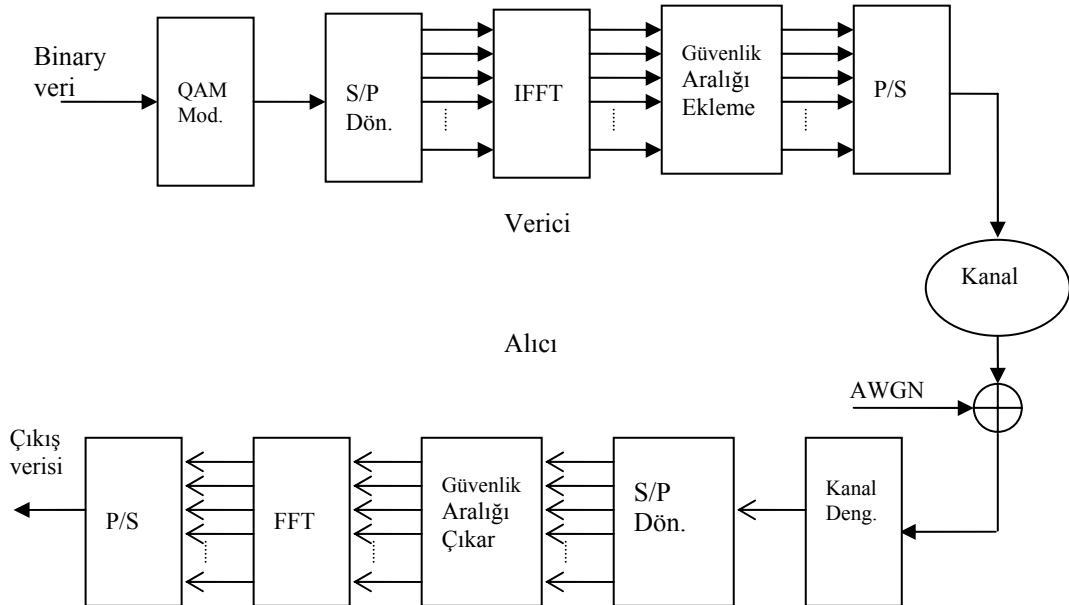
- Devre şemalarına bağlı fiziksel baskı devre tasarımı ve optimizasyonu imkanları bulunmaktadır.

ADS üç bölümden oluşmaktadır.

1. Analog/RF Bölümü
2. DSP/Haberleşme Bölümü
3. Agilent-Ptolemy

5.1.1 Simülasyonda Kullanılan Sistem Modeli

Yapılan simülasyon çalışmalarında ADS programının DSP/Haberleşme bölümü kullanılmıştır. OFDM sisteminin alıcı – verici bölümleri ve kanal yapısı ADS ile tasarlanmış, kanal dengeleme ise MATLAB programının YSA araç kutusu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda kullanılan OFDM sistem modeli Şekil 5.1’de görülmektedir. Kullanılan bu modelin blokları aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 5.1. Simülasyonlarda Kullanılan OFDM Modeli

5.1.1.1 İkili (Binary) Veri

Sistemde giriş uygulanan ikili veri, ADS programındaki “Bits” elemanı ile üretilmiştir. Bu eleman 0.5 olasılıklı rasgele ikili veriler üretmektedir.

5.1.1.2 QAM Modülatör

Girişteki seri ikili veri akışı seri halden paralele dönüştürülür. Daha sonra QAM4, QAM16 ve QAM64 kullanılarak temel bant modülasyonu gerçekleştirilir. Her bir temel bant modülasyon sonunda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5.1.1.3 Ters Fourier Dönüşümü

Tayf ile ilgili gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra buna karşı gelen zaman dalga formunu bulmak için ters Fourier dönüşümü uygulanır. Daha sonra her bir işaretin başlangıcına ve sonuna güvenlik aralığı eklenir.

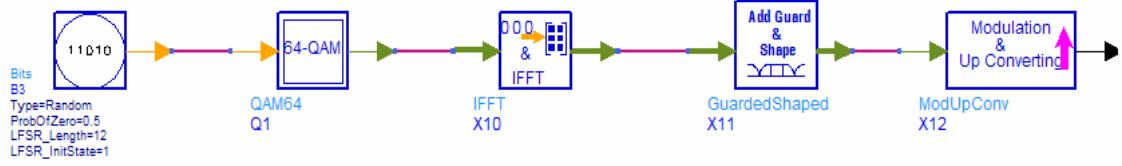
5.1.1.4 Paralel-Seri Dönüşümü

Ters Fourier dönüşümü alınarak modüle edilen paralel yapıdaki veri seri hale dönüştürülerek kanal üzerinden iletilir.

5.1.1.5 Güvenlik Aralığı

Yapılan simülasyonlarda işaretin başına ve sonuna güvenlik aralığı eklenmektedir. Eklenen işaret, OFDM sembolünün baş ve kuyruk kısmından kopyalanmaktadır. Güvenlik aralığının eklendiği bu işlemin çıkışındaki işaret seri zaman dalga formu işaret OFDM iletimi için temel bantlı işarettir.

İşarete güvenlik aralığı ekleme, vericide gerçekleştirilen en son işlemidir. Dolayısı ile güvenlik aralığı eklendikten sonra iletilecek olan OFDM işareti elde edilmiş olur. ADS kullanılarak tasarlanan OFDM vericisi Şekil 5.2’de görülmektedir. Bu blokta, yukarıda anlatılan işlemler gerçekleştirilmiştir.



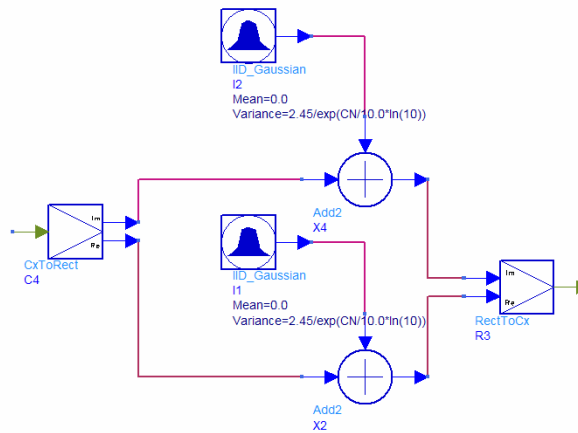
Şekil 5.2 ADS’de tasarlanan OFDM vericisi

5.1.1.6 Kanal

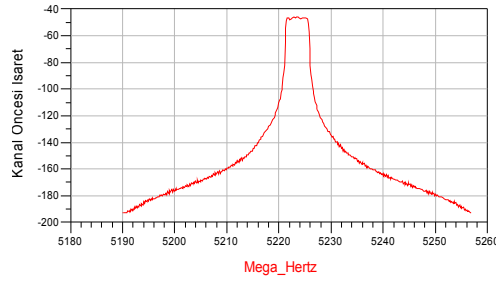
Kanal üzerinden iletilen işarete kanal modeline bağlı olarak bir gürültü eklenir. Kanal modeli, işaret gürültü oranını ve çoklu yol etkisinin modellenenebilmesini sağlar. Yapılan simülasyonlarda işarete, toplanır beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) ve Rayleigh sönümlenme etki etmektedir. İletilen işarete eklenen AWGN varyansı ile işaret gürültü oranı arasında aşağıdaki bağlantı vardır.

$$\sigma = 2.45 / e^{(SNR \cdot \ln(10) / 10)} \quad (5.1)$$

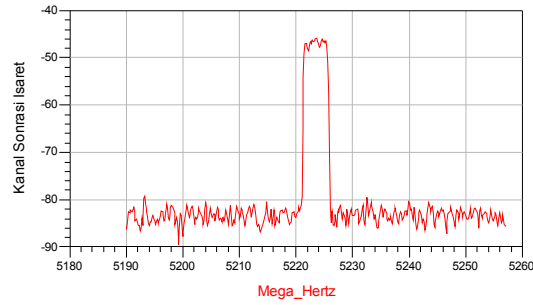
Şekil 5.3’de ADS’de, OFDM işaretine eklenen AWGN görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi kompleks OFDM işareti ilk olarak gerçel ve sanal bileşenlerine ayrılır. Daha sonra, her iki bileşene de AWGN eklenerek işaret tekrar kompleks forma dönüştürülür. Şekil 5.4’de ise OFDM işaretine AWGN eklenmeden önceki ve sonraki durum görülmektedir.



Şekil 5.3. ADS’de OFDM İşaretine AWGN Eklenmesi



(a)



(b)

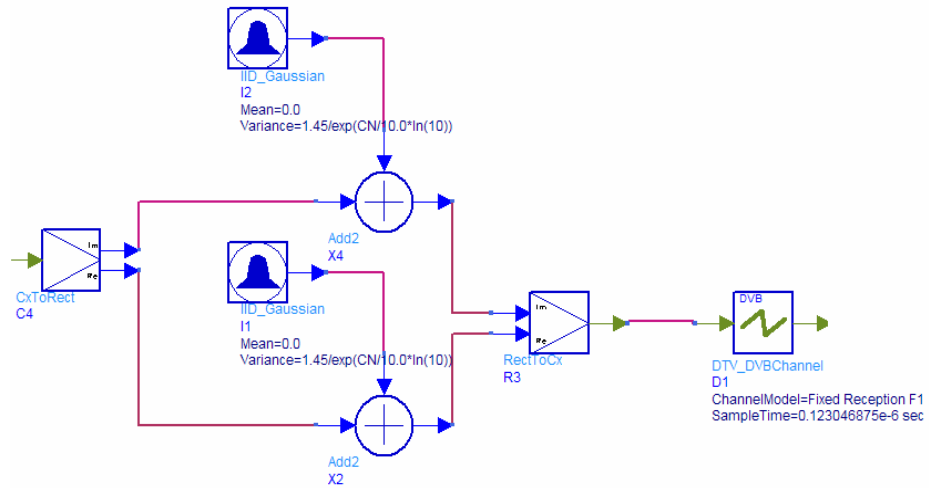
Şekil 5.4. AWGN Öncesi ve Sonrası OFDM İşareti (a) AWGN kanalı öncesi OFDM işareti (b) AWGN kanalı sonrası OFDM işareti

Şekil 5.4 (a) ve (b) incelendiğinde işaret gücündeki değişim gözlemlenebilir. İşarete oluşan bu değişimler, kanal dengeleme kullanılarak ortadan kaldırılmalıdır.

OFDM işaretine, AWGN gürültüsüne ek olarak çoklu yol etkileri de eklenmiştir. Eklenen bu kanal modeli, 20 adet yansıyan yola sahip çok yollu sönümlenme kanalıdır. Kanal, Rayleigh dağılımına göre modellenmiştir. Tablo 5.1’de bu modele ait zayıflama, faz ve gecikme değerleri verilmiştir. Şekil 5.5’te ise AWGN’ e ek olarak, eklenen çok yollu kanal modeli görülmektedir.

Tablo 5.1 Simülasyonda Kullanılan Çok Yollu Kanal Parametreleri

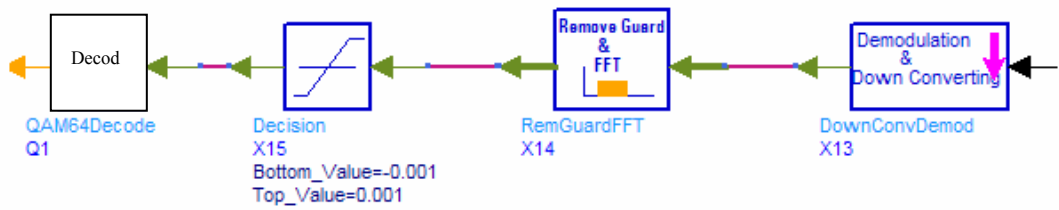
	Zayıflama	Faz (rad)	Gecikme (μs)
1	0.057662	1,003019	4,855121
2	0.176809	5,422091	3,419109
3	0.407163	0.518650	5,864470
4	0.303585	2,751772	2,215894
5	0.258782	0.602895	3,758058
6	0.061831	1,016585	5,430202
7	0.150340	0.143556	3,952093
8	0.051534	0.153832	1,093586
9	0.185074	3,324866	5,775198
10	0.400967	1,935570	0.154459
11	0.295723	0.429948	5,928383
12	0.350825	3,228872	3,053023
13	0.262909	0.848831	0.628578
14	0.225894	0.073883	2,128544
15	0.170996	0.203952	1,099463
16	0.149723	0.194207	3,462951
17	0.240140	0.924450	3,664773
18	0.116587	1,381320	2,833799
19	0.221155	0.640512	3,334290
20	0.259730	1,368671	0.393889



Şekil 5.5 AWGN'e ek olarak eklenen çok yollu kanal modeli

5.1.1.7 Alıcı

Temel olarak alıcı, vericide yapılan işlemlerin tersini gerçekleştirmektedir. Eklenen güvenlik aralığı işaretten çıkarılır. Daha sonra iletilen orijinal işaret tayfını bulmak için her bir işaretin FFT'si alınır. Elde edilen işaret, QAM demodülatör kullanılarak ikilik veri işaretine dönüştürülür. Son olarak ikilik veri, orijinal veri ile aynı uzunluğa getirilir. Şekil 5.6'da ADS kullanılarak tasarlanan OFDM alıcısı görülmektedir.



Şekil 5.6 ADS kullanılarak tasarlanan OFDM alıcısı

5.1.1.8 Kullanılan Test Parametreleri

Tablo 5.2'de OFDM işareti üzerinde gerçekleştirilen simülasyonlarda kullanılmış olan parametreler görülmektedir. Sistemde 128 adet taşıyıcı kullanılmıştır. Burada, her bir kullanıcının çoklu taşıyıcılı olması sağlanmıştır. Böylece frekans seçici sönmülenmeden dolayı birkaç taşıyıcı kaybolacak olursa, geriye kalan taşıyıcılar ileri hata düzeltmenin kullanılmasıyla kaybolan verinin geri elde edilmesini sağlarlar. Simülasyonlarda taşıyıcı modülasyon metodu olarak QAM kullanılmıştır.

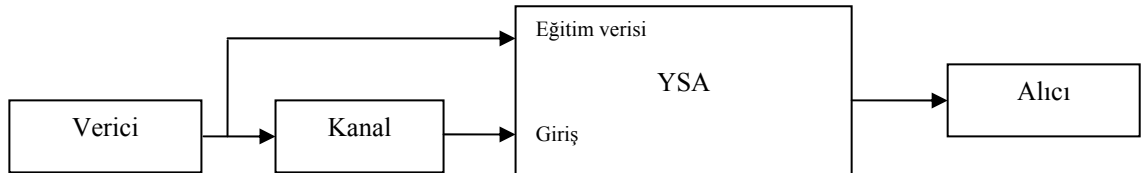
Tablo 5.2. Simülasyonlarda Kullanılan Sistem Parametreleri

Parametre	Değer
Kullanılan Taşıyıcı Modülasyon	QAM4, QAM16, QAM64
FFT Boyutu	2048
Kullanılan Taşıyıcı Sayısı	256
Güvenlik Aralığı	32
Güvenlik Aralığı Tipi	Dairesel Ön Ek ve Son Ek

5.2 Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Kanal Dengeleme Gerçekleştirilmesi

Kanal dengeleme işlemi, alıcıda gerçekleştirilmektedir. Alıcıda yapılan ilk işlem kanal dengelemedir. Kanal dengeleme sonrası elde edilen işaret, OFDM alıcısında uygulanmaktadır. Daha sonra, bu işaret alıcıda demodüle edilir.

Simülasyon çalışmalarında, kanal dengeleme MATLAB programının yapay sinir ağları (YSA) araç kutusu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere MATLAB programı sadece kanal dengeleyici tasarımında kullanılmıştır. OFDM sisteminin alıcı ve vericisi ADS programında tasarlanmıştır. YSA girişi olarak kanal çıkışındaki işaret kullanılmıştır. YSA’da eğitim işlemini gerçekleştirmek için kanal girişindeki OFDM işareti kullanılmıştır. YSA’nın çıkışı ise dengelenmiş işarettir. YSA, kanal girişindeki bozulmamış işaret kullanılarak eğitildiği için, eğitim işleminden sonra ağ girişine uygulanan kanal çıkışındaki bozulmuş işaret, eğitim sonucu elde edilen ağırlıklara bağlı olarak dengelenecektir. Sistemin işaret – gürültü oranına bağlı olarak eğitim işlemi güncellenmektedir. Aşağıdaki şekilde kanal dengeleyici olarak kullanılan YSA girişleri görülmektedir.



Şekil 5.7 Kanal dengeleyici olarak YSA’nın kullanılması

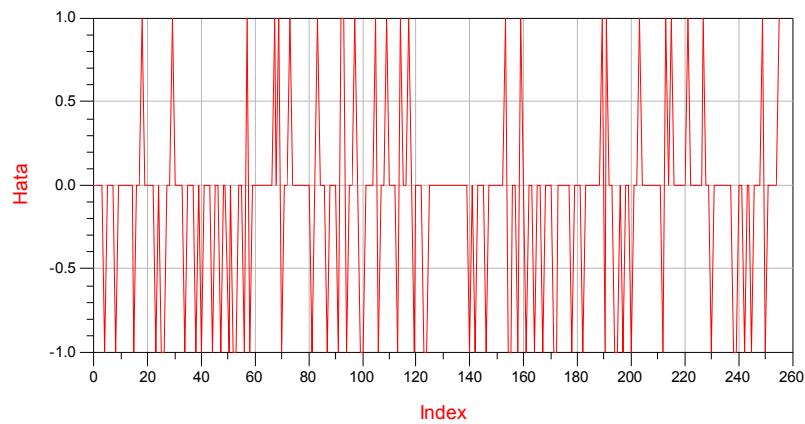
Şekilden de görüldüğü üzere kanal girişindeki işaret, sadece ağ eğitimi için kullanılmaktadır. Eğitim işlemi gerçekleştirildikten sonra kanal çıkışındaki bozulmaya maruz kalan OFDM işaretinden bu bozucu etkiler çıkarılır. Kanal dengeleme sonunda elde edilen işaret, kanal girişindeki işarete yakın bir işarettir. Yani, dengeleme işlemi sonrasında bozucu etkiler tamamen ortadan kaldırılamamaktadır. Sistemde işaret – gürültü oranı (SNR) arttıkça, sistemin bit – hata oranı (BER) azalmaktadır. Bunun anlamı, SNR oranı attıkça dengeleme işlemi

sonrasında bozucu etkileri daha çok ortada kaldırılabildiğidir. Aşağıda elde edilen simülasyon sonuçları görülmektedir.

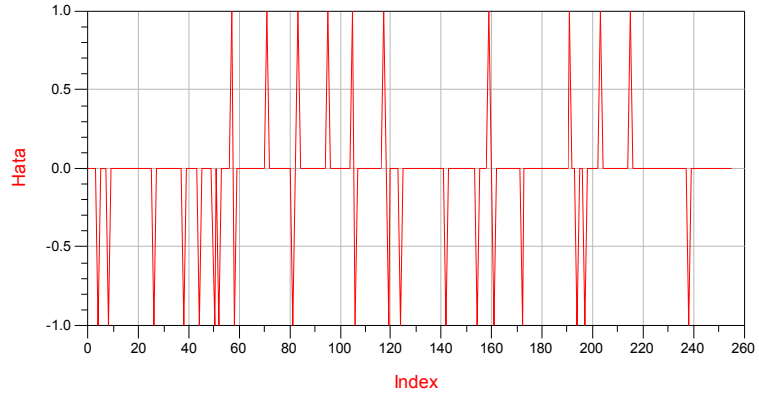
Kanal dengeme için kullanılan YSA parametreleri aşağıda verilmektedir. Bu parametreler, yapılan simülasyonlar sonunda elde edilen optimum parametrelerdir.

- Giriş Sayısı:2
- Ara Katman Sayısı: 2
- Nöron sayıları: 5,12
- Çıkış Sayısı:2
- Epoch sayısı: 250
- Öğrenme Algoritması: “Levenberg-Marquart”
- Transfer fonksiyonu:” tansig”

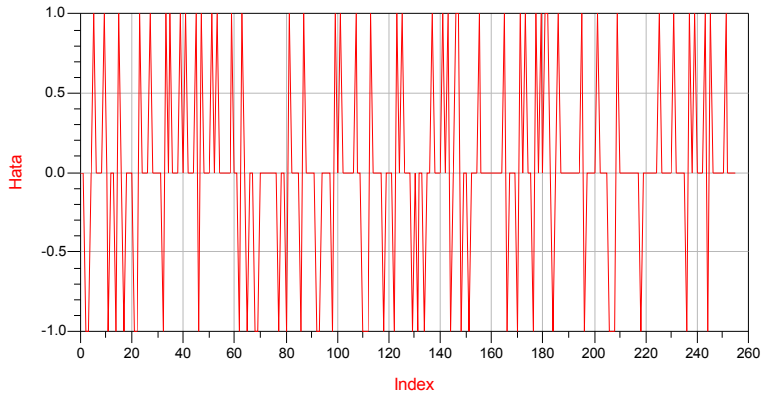
Şekil 5.8 (a) ve (b)’de sırasıyla SNR= 2 dB ve SNR=10 dB için hata işaretleri görülmektedir. Hata işareti, orijinal girişi işareti ile kanal dengeleme sonrası elde edilen çıkış işareti arasındaki farktır. Şekillerden de görülebileceği üzere sistemde işaret – gürültü oranı (SNR) arttıkça hata azalmaktadır. Şekil 5.8 (c)’ de ise kanal dengeleme yapılmadan elde edilen hata işareti görülmektedir. Bu simülasyonda, SNR=10 dB olarak alınmıştır.



(a)



(b)

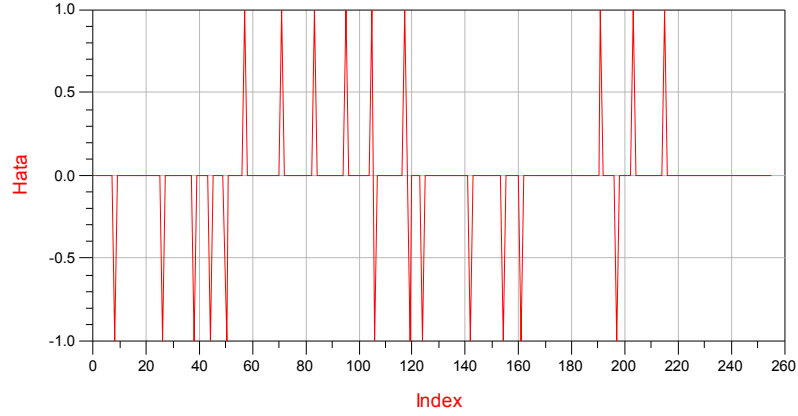


(c)

Şekil 5.8 Hata işaretlerinin karşılaştırılması (a) SNR=2 dB için kanal dengeleme sonrası hata işareti (b) SNR=10 dB için kanal dengeleme sonrası hata işareti (c) SNR=10 dB için kanal dengeleme yapılmadığı durumda hata işareti

Şekil 5.8 (b) ve (c)'e göre kanal dengelemenin yapılmadığı durum ile kanal dengelemenin gerçekleştirildiği durum karşılaştırıldığında, hata oranının kanal dengeleme yapılmadığı durumda arttığı görülmektedir. Bu hata işaretleri QAM64 temel bant modülasyonu kullanılarak elde edilmiştir. Temel bant modülasyon olarak QAM4

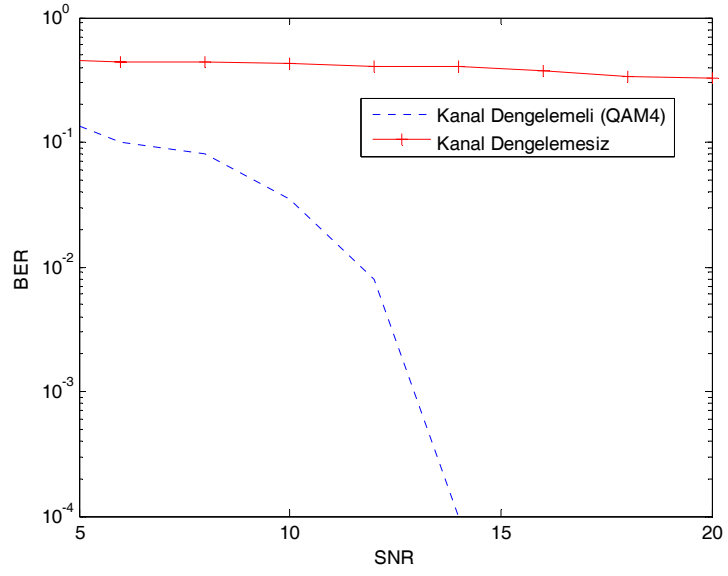
ve QAM16 kullanıldığında da benzer şekilde kanal dengeleme sonrası hatanın azaldığı görülebilir. Şekil 5.9’ da SNR=16 dB için elde edilen hata işareti görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere sistemde SNR değeri arttıkça hatalı bit sayısı düşmektedir.



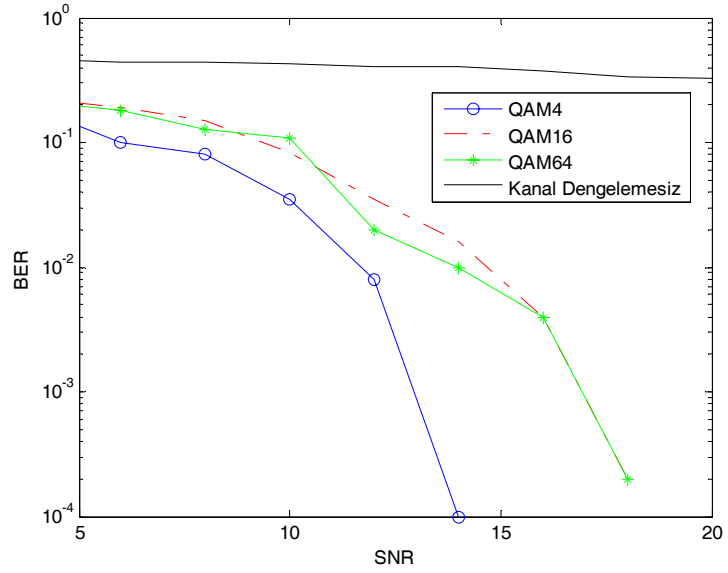
Şekil 5.9 SNR=16 dB için kanal dengeleme sonrası hata işareti

Şekil 5.10’da QAM4 modülasyonu kullanılarak tasarlanan sistemde kanal dengelemenin uygulandığı ve kanal dengelemenin uygulanmadığı durum için elde edilen BER değerleri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere kanal dengeleme sonunda BER değeri SNR oranı arttıkça azalmaktadır. İdeal bir sistemde BER değerinin sıfır olması istenir. Dolayısıyla yapay sinir ağları kullanılarak gerçekleştirilen kanal dengeleme işlemi, iyi sonuçlar vermektedir.

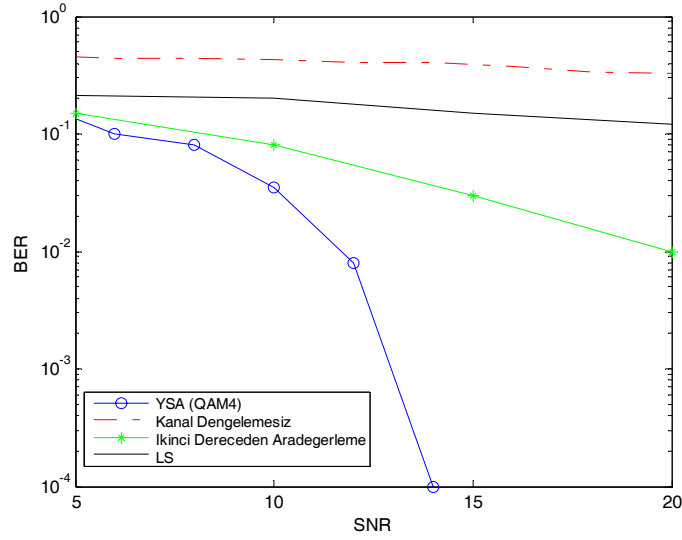
Şekil 5.11’de ise QAM4, QAM16 ve QAM64 modülasyon teknikleri kullanılarak elde edilen BER sonuçları görülmektedir. Şekilde, QAM4 temel bant modülasyonu kullanılarak elde edilen sonuçların, diğer modülasyon teknikleri ile elde edilen sonuçlardan daha iyi olduğu görülebilir. Ayrıca, YSA kullanılarak gerçekleştirilen kanal dengeleme sonuçlarının, kanal dengeleme yapılmadan elde edilen sonuçlardan çok daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 5.10 Kanal dengelemenin uygulandığı ve kanal dengelemenin uygulanmadığı durum için elde edilen BER değerleri



Şekil 5.11 Çeşitli modülasyon teknikleri için kanal dengeleme sonunda elde edilen BER değerleri



Şekil 5.12 LS, İkinci Dereceden Aradeğerleme ve YSA tekniklerinin karşılaştırılması

Şekil 5.12’de, literatürde kanal kestirimi için geliştirilmiş tekniklerden En Küçük Kareler (LS) ve İkinci Dereceden Aradeğerleme (Second Order Interpolation) teknikleri ile tez çalışmasında kullanılan YSA tekniğinin karşılaştırılması görülmektedir. Şekilden de görülebileceği üzere YSA tekniği kullanılarak gerçekleştirilen kanal dengeleme işlemi, diğer tekniklerle karşılaştırılabilecek sonuçlar vermektedir. Tablo 5.3’de, kullanılan modülasyon tekniklerine bağlı olarak elde edilen BER verilmektedir.

Tablo 5.3 İşaret – Gürültü oranlarına göre Bit – Hata oranları

SNR	BER (QAM4)	BER (QAM16)	BER (QAM64)
2	0.215	0.297	0.254
4	0.180	0.220	0.211
6	0.100	0.190	0.180
8	0.080	0.140	0.129
10	0.035	0.082	0.109
12	0.008	0.035	0.020
14	0.001	0.016	0.010
16	0.001	0.004	0.004
18	0.001	0.001	0.001

6. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yüksek hız gerektiren kablosuz haberleşme sistemleri için uygun bir modülasyon tekniği olan Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM); avantajları, dezavantajları, sistem modeli ve uygulama alanları bakımından detaylı olarak incelenmiştir.

OFDM sistem performansını etkileyen etkenlerden olan çok yollu yayılımın etkileri ve bu etkilerin yapay sinir ağları kullanılarak ortadan kaldırılması, bu tezin konusunu teşkil etmektedir. Yapılan çalışmayı iki bölüme ayrılabilir. Birinci bölüm olan OFDM sistem tasarımıdır. İkinci bölüm ise tasarlanan sistemde kanal dengelemenin gerçekleştirilmesidir. Her iki bölüm de farklı programlar kullanarak tasarlanmıştır. Kullanılan bu programlar, ADS (Advanced Desing System) ve MATLAB'dir. Fakat çalışmalar, ADS programı üzerinde yoğunlaşmıştır.

Yapılan simülasyon çalışmalarında OFDM sistemi, 'Agilent Technologies' firmasının yüksek frekans Elektronik Tasarım Otomasyon (EDA) yazılımı olan ADS programı kullanılarak tasarlanmıştır. Agilent firmasına ait RF-IC, Analog/RF ve DSP sentez simülatörlerini içinde barındırmaktadır. Ayrıca, kanal dengeleme amacıyla geliştirilen yapay sinir ağları yazılımı MATLAB programında hazırlanmış ve bu yazılım ADS programına adapte edilmiştir. Böylece her iki programın ortak çalışması sağlanmıştır. MATLAB programının YSA araç kutusu, çalışmalarda sadece kanal dengeleyici olarak kullanılmıştır.

Simülasyon çalışmalarının amacı farklı sistem parametrelerine sahip OFDM işaretleri üretmek ve farklı kanal parametreleri altında OFDM sistemini test etmektir. Test parametreleri, ADS programında aracılığı ile kontrol edilmiştir. ADS programında

tasarlanan OFDM sistemi ile elde edilen işaretler, yine ADS programında tasarlanan çok yollu kanal modeline uygulanmıştır. Böylece işaret, Rayleigh dağılımına bağlı olarak modellenen kanal ile bozucu etkilere maruz bırakılmıştır. Kanal çıkışındaki işaret, YSA ile tasarlanan kanal dengeleyiciye uygulanmıştır. Burada amaç, kanalın bozucu etkilerinin ortadan kaldırılmasıdır. YSA çıkışındaki dengelenmiş işaret daha sonra yine ADS programında tasarlanan OFDM alıcısına uygulanarak demodüle edilmiştir. Böylece, orijinal giriş verisine yakın bir çıkış işareti elde edilmiştir. Simülasyonlarda, tasarlanan sistemler için işaret – gürültü oranına bağlı olarak (SNR) bit – hata oranları (BER) elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, literatürde kullanılan tekniklerden En Küçük Kareler ve İkinci Dereceden Aradeğerleme teknikleri ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonrasında, tez çalışmasında önerilen tekniğin bu tekniklerden daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Böylece, elde edilen simülasyon sonuçlarına dayanarak YSA'nın kanal dengeleyici olarak kullanılabileceği ortaya konulmaktadır.

Bu tez çalışmasının, literatürde mevcut olan tekniklerden diğer bir farkı ise ADS ve MATLAB programlarının aynı simülasyonlarda ortak olarak kullanılmasıdır. OFDM sistemi ADS kullanılarak tasarlanırken, kanal dengeleyici MATLAB programının YSA araç kutusu kullanılarak tasarlanmıştır. Giriş ve çıkış işaretleri arasındaki hata değerleri yine ADS programında hazırlanan analiz blokları ile elde edilmiştir.

Yapılacak olan yeni çalışmalarda, literatürde mevcut olan kanal dengeleme teknikleri ile YSA sonuçları kıyaslanabilir. Ayrıca, yapay sinir ağlarının eğitiminde farklı öğrenme algoritmaları kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir. Bu çalışmada kullanılan QAM temel bant modülasyona ek olarak BPSK, QPSK, 16PSK ve 256PSK modülasyonları kullanılabilir. Ayrıca, yapay sinir ağlarına ek olarak genetik algoritma da kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında, OFDM sistem performansını etkileyen en önemli faktörlerden olan çok yollu kanal etkileri mümkün olduğunca ortadan kaldırıldığında, yüksek hız gerektiren kablosuz haberleşme sistemlerinde bir modülasyon tekniği olarak OFDM' in uygunluğunun artırılabilceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Van Nee, R., Prasad, R., OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House Publisher, 2000.
2. Edfors, O., et al., An Introduction to Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, Technical Report, 1996.
3. Speth, N., et al., Optimum Receiver Design for OFDM Based BroadBand Transmission, IEEE Transactions on Communications, 49(4), 571-578, 2001.
4. Zhao, Y., Haggman, S.G., Intercarrier Interference Self-Cancellation Scheme for OFDM Mobile Communication System, IEEE Transactions on Communications, 49(7), 1185-1191, 2001.
5. Li, Y., Cimini, L.J., Bounds on the Interchannel Interference of OFDM in Time Varying Impairments, IEEE Transactions on Communications, 49(3), 401-404, 2001.
6. Coleri, S., Ergen, M., Puri, A., Bahai, A., Channel Estimation Based Techniques Based on Pilot Arrangement in OFDM Systems, IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 48, 223-229, 2002.
7. Van De Beek, J. J., Edfors, O., Sandell, M., Wilson, S. K., Brjesson, P. O., OFDM Channel Estimation by Singular Value Decomposition, IEEE Transactions on Communications, 46(7): 931-939, 1998.
8. Dudul, S. V., Ghatol, A. A., Identification of Linear Dynamical Time-Variant Systems using Feedforward Neural Network, IE(I) Journal-ET, Vol. 84, 2004.
9. Sağiroğlu, Ş., Beşdok, E., Erler, M., Mühendislikte Yapay Zeka Uygulamaları 1", Ufuk Yayınevi, Kayseri, 2003.
10. Van De Beek, J. J., Edfors, O., Sandell, M., Wilson, S. K., Brjesson, P. O., On Channel Estimation in OFDM Systems, IEEE 45th Vehicular Technology Conference, 815-819, Chicago, 1995.
11. Doukopoulos, X., Moustakides, G.V. , Adaptive Algorithms for Blind Channel Estimation in OFDM Systems, IEEE International Conference on Communications ICC'2004, Paris, 2004.

12. Takeda, D., Atarashi, H., Nakagawa, M., Orthogonal Multicode OFDM-DS/CDMA System Using Partial Bandwidth Transmission, IEICE Transactions on Communications, E81-B(11), 2183-2190, 1998.
13. Zhu, J., Wong, W.C., Desilva, L.C., Study of Performance of OFDM-CDMA System with Various Processing Gains, IEICE Transactions on Communications, E84-B(3), 678-681, 2001.
14. Bingham, J. A. C., Multicarrier Modulation for Data Transmission: An Idea Whose Time Has Come, IEEE Communication Magazine, 28(5):5-14, May 1990.
15. Alard, M., Lasalle, R., Principles of Modulation and Channel Coding for Digital Broadcasting Mobile Receivers, EBU Review – Technical, (224):168-190, Aug 1987.
16. Frenger, P., Suenesson, A., Parallel Combinatory, OFDM Signalling, IEEE Transactions on Communications, 47(4), 558-567, 1999.
17. Pollet, Van Bladel, T., M., Moenelaey, M., BER Sensitivity of OFDM Systems to Carrier Frequency Offset and Wiener Phase Noise, IEEE Transaction on Communications, Vol. 43, No. 2/3/4, Feb/Mar/Apr 1993, pp. 191-193.
18. Arrinda, A., et al, Digital Terrestrial Television Field Trials and Coverage Measurements in Spain, IEEE Transactions on Broadcasting, 45(2), 171-176, 1999.
19. Tomba, L., Krzymien, W. A., Effect of Carrier Phase Noise and Frequency Offset on the Performance of Multicarrier CDMA Systems, Proceedings ICC'96, Dallas TX, Jun 1996, Paper S49.5, pp. 1513-1517.
20. Wang, Z., Giannakis, G.B., Wireless Multicarrier Communications, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 17, No. 3, May 2000, pp. 29-48.
21. Abhayawardhana, V., I. Wassell, Residual Frequency Offset Correction for Coherently Modulated OFDM Systems in Wireless Communications, Proc. IEEE Veh. Technology Conference, pp. 777-781, May 2002.
22. Alamouti, S., A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications, IEEE J. Sel. Areas Communications, pp. 1451-1458, October 1998.

21. El-Tanany, M. S., Y. Wu, L. Hazy, OFDM Uplink for Interactive Broadband Wireless: Analysis and Simulation in the Presence of Carrier, Clock and Timing Error, IEEE Transactions Broadcasting, pp. 3-19, March 2001.
22. Goldsmith, A., Wireless Communications, Cambridge University Press, NewYork, 2005.
23. Hanzo, L., M. Munster, B. J. Choi, T. Keller, OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting, Wiley, West Sussex, England, 2003.
24. Steendam, H., Moeneclaey, M., The Effect of Synchronization Errors on MC-CDMA Performance , Proceedings ICC'99, Vancouver, Canada, Jun 1999, Paper S38.3, pp. 1510-1514.
27. Moose, P., A Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Frequency Offset Correction, IEEE Transactions on Communications, pp. 2908-2914, October 1994.
28. Mitran, P., S. Sandhu, On Phase Noise Compensation in STC-Encoded OFDM Systems, IEEE Communications Letters, 2005.
29. Van Nee, R., R. Prasad, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House, Boston, 2000.
30. Pollet, T., Van Bladel, M., M. Moeneclaey, BER Sensitivity of OFDM Systems to Carrier Frequency Offset and Wiener Phase Noise, IEEE Transactions on Communications, pp. 191-193, February-April 1995.
31. Zhao, Y. and S.-G. Haggman, Intercarrier Interference Self-Cancellation Scheme for OFDM Mobile Communication Systems, IEEE Transactions on Communications, pp. 1185-1191, July 2001.
32. Brandao, J., Interference Effect on The Performance of PSK and QAM Systems, IEE Proceedings I, Vol. 138, pp. 331—337, Aug. 1991.
33. C. A., Corral, S., Emami, G., Rasor, Multi-Band OFDM Interference on In-Band QPSK Receivers, IEEE 802.15-04/315r0, July 2004.
34. C. A., Corral, S., Emami, G., Rasor, Multi-band OFDM Interference on In-Band QPSK Receivers Revisited, Doc. IEEE 802.15-04/451r0, Sept. 2004.
35. Evans, B. G., Baughan, K., Vision of 4G, Electronics & Communication Engineering Journal, Vol. 12, No. 6, pp. 293 – 303, December 2000.

36. Jeon, W. G., An Equalization Technique for Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Systems in Time-Variant Multipath Channels, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 47, No. 1, pp. 27 – 32, July 2001.
37. Coleri, S., Ergen, M., Puri, A., Bahai, A., Channel Estimation Techniques Based on Pilot Arrangement in OFDM Systems, *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 48, No. 3, September 2002.
38. Deneire, L., Vandenameele, P., Van Der Perre, L., Gyselinckx, B., Engels, M., A Low-Complexity ML Channel Estimator for OFDM, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 51, No. 2, February 2003.
39. Larsson, E. G., Liu, G., Li, J., Joint Symbol Timing and Channel Estimation for OFDM Based WLANs, *IEEE Communications Letters*, Vol. 5, No. 8, August 2001.
40. Li, Y., Cimini, L.J., Sollenberger, N.R., Robust Channel Estimation for OFDM Systems with Rapid Dispersive Fading Channels, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 46, No. 7, July 1998.
41. Koffman, I., Roman, V. Tang, X., Alouini, M., Goldsmith, A.J., Effect of Channel Estimation Error on M-QAM BER Performance in Rayleigh Fading, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 47, No. 12, pp. 1856, Dec. 1999.
42. Erceg, V., Hari, K. V. S., Smith, M.S., Baum, D. S., Channel Models for Fixed Wireless Applications, Contribution to IEEE 802.16.3, Jul. 2001.
43. Prasad, R., Hara, S., An Overview of Multi-Carrier CDMA, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 35, No.12, pp. 126-33, Dec. 1997
44. Yee, N. , Linnartz, J. P., Fettweis, G., Multi-Carrier CDMA in Indoor Wireless Radio networks, In Proc. of PIMRC'93, Yokohama Japan, pp. 109-113.
45. Tomba, L., Krzymien, W.A, Sensitivity of the MC-CDMA Access Scheme to Carrier Phase Noise and Frequency Offset, *IEEE Transactions on Veh. Tech.* Vol. 48, No. 5, pp. 1657-1665, Sept. 1999
46. Paulraj, A.; Nabar, R.; Gore, D.; Introduction to Space-Time Wireless Communications, Cambridge University Press 2003.
47. Tarokh, V., Alamouti, S. M., Poon, P.; New Detection Schemes for Transmit Diversity with no Channel Estimation, *IEEE International Conference on Universal Personal communications*, Oct 1998, Vol. 2, pp. 917-20.

48. Winters, J. H.; The Diversity Gain of Transmit Diversity in Wireless Systems with Rayleigh Fading, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Feb 1998, Vol. 47, No. 1, pp. 119-23.
49. Stuber, G.; Principles of Mobile Communications, Kluwer Academic Publishers, 2nd Edition, 2001.
50. Paulraj, A. J.; Papadias, C. B.; Space-time processing for wireless communications, IEEE Signal Processing Magazine, Nov 1997, pp. 49-83.
51. Weinstein, S. B., Ebert, P. M., Data Transmission by Frequency Division Multiplexing using the Discrete Fourier Transform, IEEE Transaction on Communications., Vol. 19, pp.628-643, October 1971.
52. Proakis, J. G. ve Salehi, M., 1994. Communications Systems Engineering. Prentice -Hall.
53. Sklar B., 1997, Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems, IEEE Communications Magazine, 90- 109.
54. Stüber, G. L., 2000. Principles of Mobile Communication. Kluwer Academic Publishers.
55. S. M. Alamouti, 1998, A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications, IEEE Journal on Select Areas In Communications, Vol. 16, No. 8., 1451- 1458.
56. Tarokh, V., Jafarkhani, H. ve Calderbank A. R., 1999, Space-Time Block Codes For Orthogonal Designs, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 45, No. 5, 1456- 1467.
57. Naguib, A., Seshardi, N. ve Calderbank, A. R., 2000, Space-Time Coding and Signal Processing for High Data Rate Wireless Communications, IEEE Signal Processing Magazine, 76- 91.
58. Liew, T. H. ve Hanzo L., 2002, Space-Time Codes and Concatenated Channel Codes for Wireless Communications, Proceedings of The IEEE, Vol. 90, No. 2., 187- 219.
59. Gore, D., Paulraj, A., 2001, Space-Time Block Coding With Optimal Antenna Selection, IEEE Communications Letters, 2441- 2444.
60. Nabar R. U., Gore, D. A. ve Paulraj, A., 2000, Optimal Selection And Use Of Transmit Antennas In Wireless Systems, International Conference on Telecommunications, Acapulco, Mexico.

61. Wittneben, A., 1991, Base Station Modulation Diversity For Digital SIMULCAST, IEEE Vehicular Technology Conf. , 848- 853.
62. Hagan, M.T., Demuth, H.B., Beale, M., Neural Network Desing, PWS Publishing Company, Boston, 1995.
63. J. M. Zurada, Introduction to Artificial Neural Networks, West Publishing Company, 1992.
64. Demuth, Demuth, H.B., Beale, Neural Toolbox for Use with Matlab, The Math Works, M.A., 2001.
65. Haykin, S., Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Macmillan Publishing, New York, 1994.
66. Lawrey, E., The Suitability of OFDM as a Modulation Technique for Wireless Telecommunications, with a CDMA Comparison, Ph. D. Thesis, James Cook University, USA, 1997.
67. Heiskala, J. and J. Terry, OFDM Wireless LANs: A Theoretical and Practical Guide, Sams, Indianapolis, IN, 2002.
68. Ramasama, V.C., Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Report, 2000.
69. Xie, Y., Georgiades, C. N., An EM-Based Channel Estimation Algorithms for OFDM with Transmitter Diversity, Ph.D. Thesis, 2000.
70. Steendam, H., Moeneclaey, M., Sensitivity of Orthogonal Frequency-Division Multiplexed Systems to Carrier and Clock Synchronization Errors, Signal Processing, Vol. 80, No. 7, Jul 2000, pp. 1217-1229.

ÖZGEÇMİŞ

Abdullah Tuncay ÖZŞAHİN 1980 yılında Kayseri’de doğdu. İlk ve orta öğretimini Kayseri’de, lise öğrenimini ise Yozgat Fen Lisesinde tamamladı. 1997-1998 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümünü kazandı. Bir yıllık hazırlık eğitiminden sonra lisans eğitimine başladı. 2002 yılında bu bölümden mezun oldu. İki yıl süreyle özel sektörde teknik bölüm sorumlusu olarak çalıştı. 2004 yılında E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2005 yılında Kayseri Meslek Yüksek Okulu Elektrik Bölümünde Okutman olarak göreve başladı. Halen aynı görevini sürdürmektedir.

Adres: Erciyes Üniversitesi Kayseri Meslek Yüksek Okulu -38039- Kayseri

Telefon: (352) 4374901 (İçhat: 40704)